

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

Klara Pucko

**LINIJSKI TOPLOTNI MOST OB ODPRTINAH V  
OVOJU LAHKIH KONSTRUKCIJ**

Diplomsko delo

Maribor, september 2011

Diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa Gradbeništvo – smer gradbeništvo  
konstrukcije.

**LINIJSKI TOPLOTNI MOST OB ODPRTINAH V OVOJU LAHKIH  
KONSTRUKCIJ**

Študentka: Klara PUCKO

Študijski program: univerzitetni, Gradbeništvo

Smer: konstrukcijska

Mentor: izr. prof. dr. Dean KOROŠAK, univ. dipl. fiz.

Lektorica: Veronika PUCKO MUHIČ, prof. slov. in univ. dipl. prevajalka za angleški jezik

Maribor, september 2011



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo

Številka: 93615281  
Maribor, 29.06.2011

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 1/10) izdajam

### SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

**Klara Pucko**, študent(ka) univerzitetnega študijskega programa GRADBENIŠTVO, smer KONSTRUKCIJSKA SMER, lahko izdela diplomsko delo pri predmetu Gradbena fizika.

MENTOR(ICA): izr. prof. dr. Dean Korošak

**Naslov diplomskega dela:**

LINIJSKI TOPLOTNI MOST OB ODPRTINAH V OVOJU LAHKIH KONSTRUKCIJ

**Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**

LINEAR THERMAL BRIDGE AT THE OPENINGS IN THE SHELL OF LIGHT STRUCTURES

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 29.06.2012 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



DEKAN  
red. prof. dr. Miroslav Premrov

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv

### ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Deanu Korošaku za vso pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Posebna zahvala gre tudi družini in fantu Jerneju za pomoč in podporo med študijem in v času pisanja diplomske naloge.

## **LINIJSKI TOPLOTNI MOST OB ODPRTINAH V OVOJU LAHKIH KONSTRUKCIJ**

**Ključne besede:** toplotna izolacija, toplotni most, toplotna prevodnost, površinska temperatura, gostota toplotnega toka, standard SIST EN ISO 10211, program AnTherm

**UDK:** 697.12(043.2)

### **Povzetek:**

*Diplomsko delo obravnava izračun toplotnih mostov na stiku okenskega okvirja in lahke konstrukcije.*

*Predstavljene so vrste ter načini vgradnje toplotne izolacije glede na izbrano konstrukcijo. Podrobneje je razčlenjen del standarda SIST EN ISO 10211, ki je najpomembnejši za izračun.*

*Obravnavana sta dva različna sistema vgradnje: (1) klasična vgradnja brez žaluzij ali rolet in (2) detajl vgradnje skritih žaluzij. Izračun temelji na sedaj veljavnem slovenskem standardu za izračun toplotnih mostov SIST EN ISO 10211 in je opravljen s pomočjo računalniškega programa AnTherm, ki omogoča tudi vizualizacijo in prikaz porazdelitve površinskih temperatur ter gostote toplotnega toka. Na koncu je podana primerjava med obema primeroma in predlogi določenih izboljšav.*

## **LINEAR THERMAL BRIDGE AT THE OPENINGS IN THE SHELL OF LIGHT STRUCTURES**

**Keywords:** thermal isolation, thermal bridge, thermal conductivity, surface temperature, heat flux, Standard SIST EN ISO 10211, program AnTherm

**UDK:** 697.12(043.2)

### **Summary:**

*In the diploma thesis, calculations of linear thermal bridges on connection of window frame and light structure are presented.*

*Types and methods of thermal isolation installation are introduced according to the chosen construction. A part of the standard SIST EN ISO 10211 that is the most important for the calculation is dismembered in detail.*

*Two types of installation are discussed: (1) classic installation without the window shades or shutters and (2) detail installation of hidden window shutters. The calculation is based on the currently valid Slovenian standard for the calculation of thermal bridges SIST EN ISO 10211 and is done with the help of the computer program AnTherm which also enables visualization and review of the surface temperature distribution and the thermal flux. In conclusion, the comparison between the two examples and suggestions for improvement are given.*

**KAZALO**

1. UVOD .....	1
2. TOPLOTNA IZOLACIJA STAVB .....	3
2.1. Vrste toplotne izolacije .....	3
2.2. Toplotni mostovi.....	9
2.3. Posledice toplotnih mostov .....	11
2.4. Toplotni mostovi pri vgradnji oken .....	12
2.5. Termografija .....	13
3. STANDARDI.....	14
3.1. Področje uporab .....	14
3.2. Načela uporabe .....	15
4. PROBLEMATIKA.....	24
5. TOPLOTNA ANALIZA S PROGRAMOM ANTHERM .....	25
5.1. O programu .....	25
5.2. Teoretično ozadje programa .....	26
5.3. Delo s programom .....	27
5.4. Prvi primer – detajl stene in okenskega okvirja brez žaluzij ali rolet.....	29
5.5. Drugi primer – detajl stene in okna s skritimi žaluzijami.....	47
6. REZULTATI.....	55
6.1. Primer brez žaluzij .....	55
6.2. Primer s skritimi žaluzijami .....	58
7. SKLEP.....	60
8. VIRI IN LITERATURA .....	62
9. PRILOGE .....	64
9.1. Naslov študentke.....	64

9.2. Kratek življenjepis .....	64
9.3. Načrti detajlov.....	65

## KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz treh različnih toplotnih izolacij (od leve proti desni: steklena volna, kamena volna, celulozni kosmiči) v različnih oblikah [2], [3], [4].....	4
Slika 2: Toplotna prehodnost masivnih nizkoenergetskih in pasivnih hiš [5].....	5
Slika 3: Primer montažnih sten Lumar IG d. o. o. [9] .....	8
Slika 4: Najpogostejša mesta za pojave toplotnih mostov v zgradbi [6].....	10
Slika 5: Rezultat dela s topografsko kamero [12].....	13
Slika 6: Prikaz simetričnih ravnin, ki jih lahko uporabljamo kot razdelilne ravnine [15]. .	15
Slika 7: Slika tabele skupin toplotnih mostov. ....	17
Slika 8: Primer geometrijskega dvodimenzionalnega toplotnega mostu.....	21
Slika 9: Predstavljeni so primeri zgoraj omenjenih rolet. Prva iz leve je nadokenska roleta, nato sledi predokenska in zadnja slika predstavlja podometno roletno [11].....	24
Slika 10: Osnovna okna, ki se odprejo ob zagonu programa .....	27
Slika 11: Okno, v katerem določimo dimenzije elementov ter njihove karakteristike.....	28
Slika 12: Prikaz vseh možnih orodij, ki nam pomagajo pri izračunih.....	29
Slika 13: Aplikacija, ki omogoča shranjevanje materialov v bazo podatkov.....	30
Slika 14: Knjižnica raznih površin, ki kasneje predstavljajo robne pogoje.....	31
Slika 15: Slike po korakih predstavljajo postopek modeliranja konstrukcije .....	32
Slika 16: Okno za določitev parametrov pred izračunom .....	33
Slika 17: Rezultati izračuna koeficienta toplotne sklopitve .....	34
Slika 18: Okno, v katerem izračunamo velikost toplotnega mostu ter določamo parametre .....	34
Slika 19: Izračun upošteva zgolj dele, obkrožene z rdečim pravokotnikom .....	35
Slika 20: Prikaz potrebne geometrije za izračun [19].....	36
Slika 21: Izračun toplotnega mostu .....	38
Slika 22: Podajanje robnih pogojev .....	38



Slika 23: Prikaz porazdelitve temperature po konstrukciji.....	39
Slika 24: Prikaz porazdelitve gostote toplotnega toka po konstrukciji .....	40
Slika 25: Grafični prikaz zgornjega stika stene z okenskim okvirjem .....	41
Slika 26: Prikaz simetrične matrike koeficientov toplotne sklopitve na stiku zgoraj .....	42
Slika 27: Velikost toplotnega mostu na stiku zgoraj .....	42
Slika 28: Porazdelitev površinske temperature na stiku zgoraj .....	43
Slika 29: Velikost gostote toplotnega toka na stiku zgoraj .....	44
Slika 30: Grafični prikaz stranskega stika .....	45
Slika 31: Velikost toplotnega mostu v primeru stranskega stika .....	46
Slika 32: Porazdelitev površinske temperature in gostote toplotnega toka na stranskem stiku .....	46
Slika 33: Grafični prikaz stranskega prereza z žaluzijami .....	47
Slika 34: Izračun linearnega toplotnega mostu za stranski stik z žaluzijami .....	48
Slika 35: Površinska temperatura stranskega prereza z žaluzijami .....	49
Slika 36: Prikaz porazdelitve gostote toplotnega toka po prerezu konstrukcije.....	49
Slika 37: Prikaz spremembe toplotnega fluksa zaradi spremembe toplotne prevodnosti ...	50
Slika 38: Grafični prikaz zgornjega detajla s skritimi žaluzijami .....	51
Slika 39: Okno za izračun toplotnega mostu .....	52
Slika 40: Prikaz porazdelitve površinskih temperatur na stiku s skritimi žaluzijami.....	53
Slika 41: Gostota toplotnega toka skozi prerez konstrukcije .....	53
Slika 42: Prikaz smeri in velikosti toplotnega toka .....	54
Slika 43: Gostota toplotnega toka v osnovnem primeru.....	55
Slika 44: Gostota toplotnega toka – okvir pomaknjen na zunanji rob.....	56
Slika 45: Detajl v primeru, da povečamo toplotno izolacijo na zunanjem robu .....	57
Slika 46: Izboljšava stene s skritimi žaluzijami.....	58
Slika 47: Izboljšan prerez s skritimi žaluzijami.....	59

**UPORABLJENI SIMBOLI**

U – toplotna prehodnost

$\lambda$  – toplotna prevodnost

R – toplotna upornost

$\psi$  – linijski toplotni most

$L_{2D}$  – koeficient toplotne sklopitve delov konstrukcije določen z 2D-izračunom

q – gostota toplotnega toka

## 1. UVOD

Razvoj gradbene fizike je v zadnjih letih doživel silovit razmah. Vse se je začelo s spoznanjem, kako močno ljudje onesnažujemo svet z vsakodnevno porabo ogromnih količin energije, pridobljene na tak ali drugačen način. Zelo hitro so se začeli pojavljati predpisi, ki so narekovali bolj ekonomično rabo energije. Eden prvih v Sloveniji je bil *Pravilnik o racionalni rabi energije pri ogrevanju in prezračevanju stavb* (1984). Kmalu za tem je bil sprejet standard JUS.UJ.5.600, ki je navajal kriterije za največje dopustne toplotne izgube stavb, minimalno toplotno stabilnost gradbenih konstrukcij in kriterije za načrtovanje obodnih konstrukcij stavbe z vidika preprečevanja površinske in notranje kondenzacije difuznega toka vodne pare. Temu so sledili še drugi JUS-standardi z obvezno uporabo.

Tako je sedaj v Sloveniji sprejetih več standardov, ki narekujejo učinkovito porabo energije, kvaliteto uporabljenih materialov, minimalno debelino toplotne izolacije ter preprečevanje iztekanja toplote iz stavb zaradi pojava toplotnih mostov. Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST, nekdanji USM) sprejme vse nove evropske standarde, kar nas sili v razvijanje novih kvalitetnejših materialov in tehnologij v gradbeništvu na področju gradbene fizike.

Razvijajo pa se tudi nova orodja, ki omogočajo tako mikro- kot tudi makroanalize objektov. Eni takšnih analiz sta topografska in termografska analiza, ki omogočata prikaz porazdelitve površinske temperature na objektu in s tem določitev lokacije toplotnih mostov. Kot je kasneje večkrat omenjeno, so toplotni mostovi ena večjih neprijetnosti v stanovanju, saj povzročajo ne samo vizualne, ampak tudi higienske probleme.

V tej diplomski nalogi se bomo ukvarjali z določanjem velikosti toplotnih mostov na stiku okenskega okvirja in lahke konstrukcije. Vemo, da se je toplotnim mostovom nemogoče popolnoma izogniti. Standard SIST EN 14683 pa omogoča, da v primeru, ko je vrednost

psi ( $\psi$ ) manjša od  $0,01 \frac{W}{mK}$ , lahko upoštevamo, da takšnega toplotnega mostu ni, saj so njegove posledice zanemarljive. Predvidevamo, da tako majhne vrednosti psi v tej nalogi ne bomo dosegli, saj je za to potreba pasivna stena in dodatno izoliran okenski okvir. Ukvarjali se bomo zgolj z nekoliko izboljšano steno in običajnim okvirjem. S takšnim izračunom bomo dobili občutek, kakšni toplotni mostovi se pojavljajo na običajnih konstrukcijah, in potem lahko pričnemo z optimiranjem.

Doseganje standardov pasivne hiše je zelo zapleten in dolgotrajen postopek, ki zahteva pametne rešitve za detajlna mesta, ki jih ni mogoče doseči brez poznavanja osnovnih konstrukcij. Prav takšni osnovni modeli bodo temelj te diplomske naloge.

## 2. TOPLOTNA IZOLACIJA STAVB

Že od nekdaj se ljudje trudimo ustvariti prijetno bivalno okolje, v kar spada tudi trud za ohranjanje toplega zraka v stanovanjih v času zime. Včasih so v ta namen gradili masivne stene, jih oblagali s preprogami, vgrajevali čim manj oken in postavljali dnevne prostore na jug. Dandanes se proti mrazu borimo drugače. Stavbo v celoti ovijemo v toplotno izolacijo, ki preprečuje vdor mrzlega (pozimi) in vročega (poleti) zraka. Istočasno prostore grejemo oz. hladimo, da ustvarjamo prijetno klimo. Pri tem ugotovimo, da boljšo izolacijo kot uporabimo, manj stroškov bomo imeli z ogrevanjem. Vendar tukaj niso zgolj stroški tisto, kar nas sili v iskanje vedno boljših materialov za toplotno zaščito hiše, problem je tudi v onesnaženosti zraka zaradi pretiranega spuščanja CO<sub>2</sub> v okolico (predvsem zaradi ogrevanja na fosilna goriva). Sodobna družba teži k bistvenemu zmanjšanju onesnaževanja zraka, zato je potreba po kvalitetni toplotni izolaciji nujna za izboljšanje stanja.

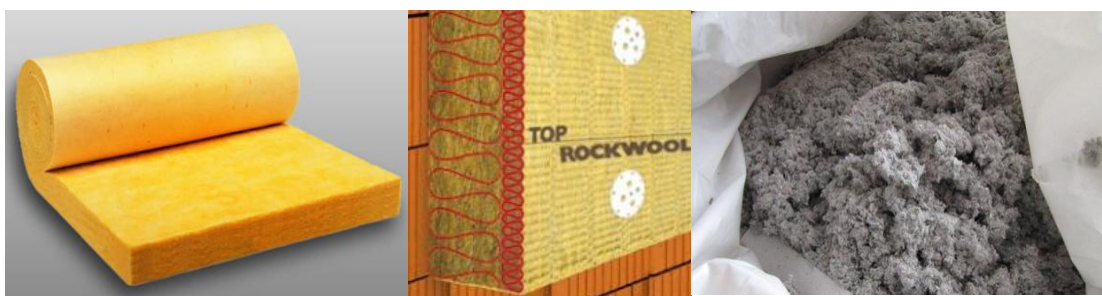
### 2.1. Vrste toplotne izolacije

Izolacijske materiale lahko razdelimo v sedem skupin [1]:

- *izolacijski material v svitkih,*
- *izolacijski material v mrežah,*
- *izolacijski material v ploščah,*
- *utorjene plošče,*
- *večplastne plošče,*
- *izolacijski trakovi,*
- *izolacije posebnih oblik (material v kosmičih, zrnat material, pena, omet – perlit).*

Najpogosteje uporabljeni materiali za toplotno izolacijo:

- *steklena volna*; izjemo nizka toplotna prevodnost  $0,033\text{--}0,045 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ , uporablja se lahko v skoraj vseh zgoraj naštetih oblikah, dobra zvočna izolativnost, prepušča paro in je negorljiva, odporna proti vlagi, staranju in tresljajem [2].
- *kamena volna*; toplotna prevodnost  $0,038 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ , prepušča paro, izjemno dobro požarna odpornost (zdrži temperaturo višjo od  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), dober zvočni izolator (preprečuje prenos udarnega zvoka med etažami) [3].
- *celulozni kosmiči*; toplotna prevodnost  $0,033\text{--}0,045 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ , najbolj organska izolacija (stari papir z dodatkom borove soli), velik fazni zamik (12–15 ur), z vpihovanjem dobi obliko plošče, ki se z leti ne poseđa, najbolj primerna za lesene konstrukcije [4].
- *ekspandiran polistiren (stiropor)*; toplotna prevodnost med  $0,035\text{--}0,040 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ , obstojen material, nestrupen, odporen na anorganske kisline in soli, ne pa na organska topila ter na UV-sevanje in na temperature preko  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , dodatki mu zmanjšujejo gorljivost, tako da se plamen po njem ne širi, majhna vodovpojnost, nizka cena [4].

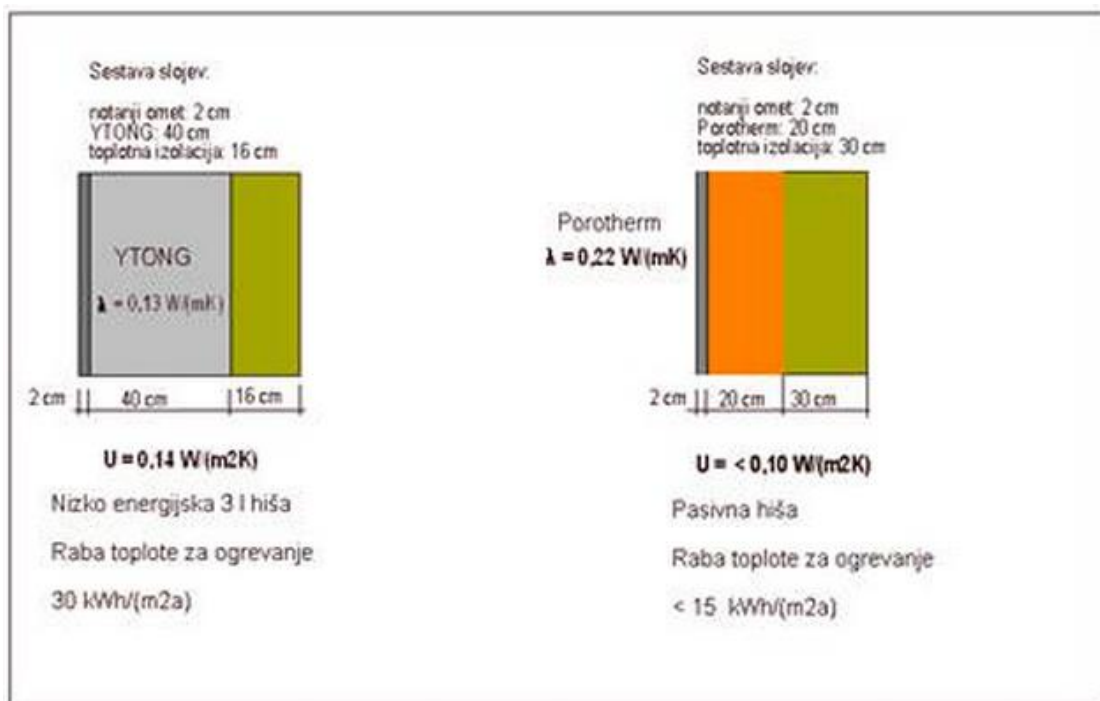


Slika 1: Prikaz treh različnih toplotnih izolacij (od leve proti desni: steklena volna, kamena volna, celulozni kosmiči) v različnih oblikah [2], [3], [4]

Ponudba kvalitetnih toplotnih izolacij na trgu je velika, zato se je potrebno odločiti, katero in kakšne oblike bomo uporabili. Pri tem je potrebno upoštevati toplotno prehodnost določene izolacije in druge lastnosti, ki vplivajo na kvaliteto bivanja. Te lastnosti so gorljivost, ekološkost, morebitna škodljivost za zdravje, uporabnost ter obstojnost.

Zelo pomembno je tudi, da se odločimo za primerno izolacijo glede na način gradnje.

Pri masivni gradnji uporabljamo drugačno izolacijo kot pri montažni leseni hiši. Večino zidanih sten je potrebno dobro toplotno izolirati. Izjeme so le stene, narejene iz opek Ytong ali Porotherm, saj imata ta dva materiala že sama po sebi majhno toplotno prevodnost. Za toplotno izolacijo običajno uporabimo plošče iz kamene ali steklene volne, včasih tudi stiropor ali kakšen drug material. Običajno moramo za izgradnjo nizkoenergetske hiše na opečni zidak 29 cm dodati vsaj 16 do 30 cm izolacije, kar lahko skupaj nanese več kot pol metra debel zid.



Slika 2: Toplotna prehodnost masivnih nizkoenergetskih in pasivnih hiš [5]

Zgoraj prikazan sistem za nizkoenergetsko in pasivno hišo je debel 58 oz. 52 cm. Zelo natančni moramo biti pri polaganju izolacije, saj se na tak način izognemo nepotrebnim toplotnim mostovom, ki radi nastanejo na slabo izdelanih stikih plošč toplotne izolacije.

Lesene hiše delujejo na drugačen način. Omogočajo zelo dobro toplotno izolativnost glede na širino sten, ki jo zahtevajo. Pri lesnih hišah v grobem ločimo:

- brunarice,
- skeletne konstrukcije in
- montažne hiše.

*Brunarica* je naravni proizvod, praviloma CO<sub>2</sub> nevtralen in ne obremenjuje okolja z nevarnimi spojinami. Gradnja brunarice ima zelo dolgo tradicijo. V planinah lahko še danes najdemo številne brunarice, tudi takšne, katerih starost presega 400 let. Prvotne brunarice so se v celoti gradile z lesom. Danes je gradnja izvedena iz večplastnih slojev in je zaradi gradbeno fizikalnih osnov z zunanje strani dobro toplotno zaščiten.

Hiša, izdelana iz lesenih brun, nudi stanovalcem prijetno počutje in najvišjo kvaliteto bivanja. Pri tem deluje notranjost brunarice kot toplotno akumulacijska masa in kot parna ovira, ki istočasno odgovarja tudi potrebam požarne zaščite. Toplotna izolacija je nameščena na zunanji strani zgradbe in tako skupaj z zunanjo oblogo ščiti vdor zraka v notranjost. Vmesna izolacija se večinoma izvede z mineralno volno. Pri brunni debeline 2, 4 ali 7 cm, je običajna debelina toplotne izolacije med 11 do 20 cm, odvisno predvsem od namena uporabe in višine zgradbe. Že te številke podajo grobo oceno tega, da lesena gradnja ne zahteva velikih debelin za doseganje dobrih rezultatov. Brunarica je energijsko varčnejša od klasično grajene zidane in dobro toplotno izolirane hiše, in sicer je kar trikrat varčnejša, saj je les sam po sebi toplejši, klasična hiša pa je v notranjosti betonska, mrzla kljub zunanji izolaciji. Površinska temperatura klasičnega zidu je zaradi boljše prevodnosti nižja, zato se zniža tudi udobje v prostoru. Za dolgo življenjsko dobo je potrebna dobra zaščita zgradbe. Zaradi udobja je bivanje v brunarici zelo prijetno [6].



Pri nas je *skeletna gradnja* razmeroma nov način gradnje družinske hiše, čeprav takšna gradnja obstaja že stoletja. Takšen način gradnje poznajo v Ameriki in Kanadi. V Evropi se je pričel v 60. letih prejšnjega stoletja, v Sloveniji pa je dosegel razmah šele v zadnjih dvajsetih letih. Pri skeletni gradnji gre za gradnjo, ki je ena izmed najbolj kakovostnih gradenj nasploh in ki omogoča dobro ter kakovostno bivalno udobje. Takšen način gradnje je v zadnjih letih spet zaživel. Zasluga za to gre gradbenim materialom, ki omogočajo odlično toplotno izolacijo, paroprepustnost in dihanje sten, hkrati pa niso nosilni oz. ne omogočajo sestave nosilne konstrukcije.

Med pomembnejšimi fizikalnimi lastnostmi je paroprepustnost. V ta namen so materiali skrbno izbrani ter nameščeni tako, da prepustnost stene za vodno izparino narašča od znotraj navzven. Vodna para nadzorovano prehaja navzven in ne zastaja v konstrukciji, zaradi česar je okolje do lesa prijazno in mu omogoča dolgo življenjsko dobo. Samo zgradbo nosi skelet in ne stene. S tem je posredno lahko pri samem načrtu velik delež steklenih sten v sami skeletni hiši. Stene pri skeletni gradnji imajo podobno kot stene pri montažni gradnji izolacijo vdelano (vpihano) v samo steno. Toplotna prevodnost zunanjih sten je izredno majhna, vrednost  $U \cong 0,12 \frac{W}{m^2K}$  zaradi izbrane izolacije, ki je najpogosteje celulozna izolacija iz kosmičev.

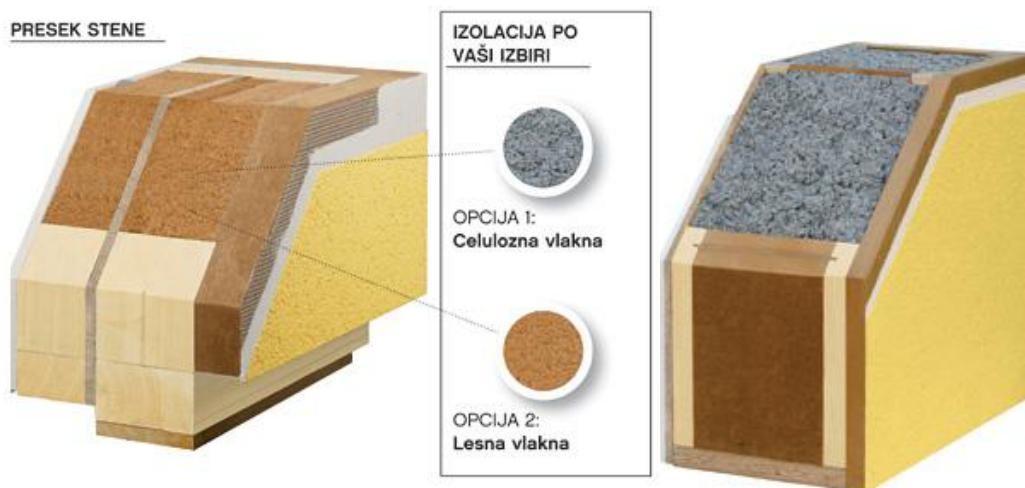
Skeletni način gradnje je primeren za gradnjo energijsko varčne ali pasivne hiše. Pri nas stoji že kar nekaj skeletnih hiš, zgrajenih na ta način, vendar je zanimanje za takšno gradnjo iz dneva v dan večje.

Skeletne hiše in gradnja ponujajo prijazno bivalno okolje med ekološko sprejemljivimi materiali, omogočajo različne arhitekturne zamisli, zagotavljajo odlično toplotno izolacijo in potresno varnost, saj je les gradivo, ki se razteza in prenaša sile iz vseh strani v primerjavi z opeko in betonom, ki prenašata le tlačne sile [8].

*Montažne hiše* imajo podoben sistem gradnje kot skeletne, le da se vse stene natančno izdelajo že v proizvodni hali. S tem se takoj zmanjšajo pomanjkljivosti, ki nastanejo zaradi vpliva okolja in vremena na izgradnjo.

Montažne hiše imajo bogato zgodovino in v nekaterih deželah predstavljajo tradicionalen tip stanovanjske gradnje. Na področju Evrope se delež montažne gradnje giblje med 20 in 30 odstotki, v Sloveniji pa proizvodnja tovrstne gradnje močno narašča. Glavna značilnost je, da jih sestavljajo na gradbišču iz prej izdelanih elementov. Gradnja montažne hiše je čista, brez večjih odpadkov, lahko pa je tudi natančnejša. Način gradnje omogoča možnost vselitve v dveh do treh mesecih od pridobitve gradbenega dovoljenja [8].

Sistemi montažnih sten so tudi bistveno tanjši od sistemov masivnih zidanih sten, ob tem da pazimo na enako oz. boljšo toplotno prevodnost stene.



Slika 3: Primer montažnih sten Lumar IG d. o. o. [9]

Debelina stene: 36,98 cm

$$U = 0,145 \frac{W}{m^2K} \quad [9]$$

Debelina stene: 45,55 cm

$$U > 0,10 \frac{W}{m^2K} \quad [9]$$

Če primerjamo sliki 2 in 3, opazimo razliko v debelini. Za nizkoenergetske zgradbe je pri zidanih konstrukcijah potrebna 20 cm debelejša stena, kar se takoj pozna na površini, ki jo stavba zaseda glede na notranje prostore.

## 2.2. Toplotni mostovi

Toplotne izgube se v stavbah pojavljajo ves čas. Nastopijo kot transmisijske ali konvekcijske izgube. Prvim se v veliki meri izognemo z dobro in kvalitetno izdelano toplotno izolacijo objekta, pametno prostorsko zasnovo zgradbe in pasivnim izkoriščanjem sončne energije.

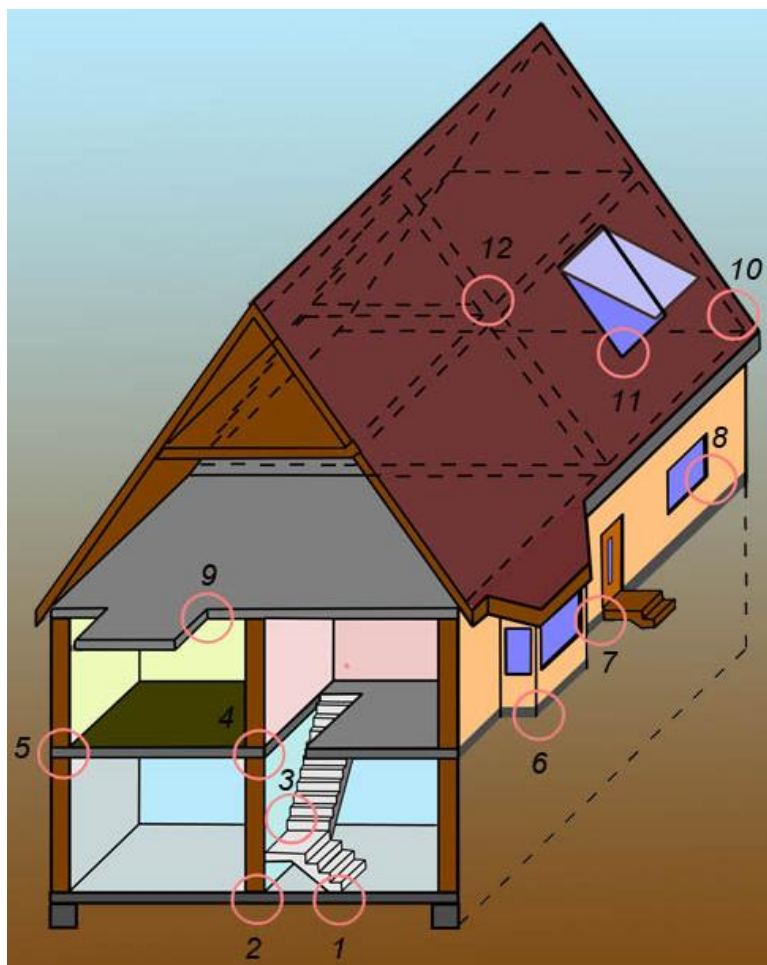
Izogibanje konvekcijskim izgubam, torej izgubam zaradi izmenjave zraka, pa je zahtevnejše in možno le do določene meje. Splošno je znano, da je nujna 0,5–0,8-kratna izmenjava zraka na uro, če želimo bivati v ugodni klimi (torej, da odvajamo ogljikov dioksid in druge pline ter vodno paro in dovajamo dovolj kisika). Vendar izmenjava zraka z zračenjem pripelje do dovajanja hladnega zraka v sobe, posledica česar je dodatna poraba energije za segrevanje. Lahko se lotimo prisilne (mehanske) izmenjave s pomočjo naprav, ki izsesavajo slab zrak in vpihujejo svežega. Ob vsem tem pa moramo paziti na nekontrolirano izmenjavo zraka skozi razpoke na obodu zgradbe. Te razpoke imenujemo toplotni mostovi. Toplotni most je mesto na zunanjem ovoju zgradbe, kjer je toplotni upor bistveno manjši kot na ostalih delih.

Toplotne mostove lahko delimo na:

- *konstrukcijske*; nesklenjenost ali navlaženost toplotne izolacije
  - najpogosteje se pojavljajo pri prebojih zaradi dimnika, zračnika, pri napuščih, pri vogalih vertikalnih protipotresnih vezi, okenskih špaletah, omaricah za rolete, balkonih, coklih, temeljih ipd.;
- *geometrijske*; (ne moremo se jim izogniti, lahko jih zgolj omilimo) na ovoju zgradbe, kjer je zunanja površina precej večja od notranje, pri kotih večjih od 90°
  - zunanji vogal stavbe, balkonske stene, AB-plošča proti neogrevanemu podstrešju, ravne strehe ipd.;
- *konvekcijske*; mesto, kjer je zaradi prekinitve ali netesnosti omogočen pretok notranjega navlaženega zraka v konstrukcijski sklop;
- *kombinirani*; v praksi se le-ti zelo pogosto pojavljajo, so kombinacija konstrukcijskih in geometrijskih toplotnih mostov;

- armiranobetonska protipotresna vogalna vez, nosilni AB-steber v zunanji steni, ravne strehe ipd.

Za potrebe računske analize toplotne mostove idealiziramo in jih delimo na točkovne in linijske. S tem predstavljamo prevladujočo obliko oz. dimenzijo toplotnega mostu.



Slika 4: Najpogostejša mesta za pojave toplotnih mostov v zgradbi [6]

Najpogostejša mesta za nastanek toplotnih mostov so prikazana na sliki [6]:

1. ležišče kletnih stopnic nad talno ploščo,
2. podnožje stopniščenega zidu nad dnom talne plošče,
3. stranska povezava stopnic na kletni zid,
4. povezava kletne stene s kletno ploščo in EG-delilne stene,

5. povezava kletne stene s kletno ploščo in EG-zunanjim zidom,
6. izstopajoča talna plošča,
7. izstopajoči vhodni podest,
8. okenski okvir in polica,
9. izstopajoči balkon z nadstreškom,
10. čelni napušč v zunanosti,
11. obroba strešnega okna z zunanje strani,
12. v hladnem podstrešju notranje pokončne stene.

### 2.3. Posledice toplotnih mostov

Delež toplotnih izgub skozi toplotne mostove je razmeroma majhen glede na izgube skozi celoten ovoj zgradbe pri običajni gradnji, vendar so lahko posledice bistvene za prijetno bivanje. Posebej pomembne so posledice toplotnih mostov pri nizkoenergetskih in pasivnih hišah. Kljub dobri toplotni zaščiti, vendar brez rešenih toplotnih mostov, lahko delež toplotnih izgub pri takšnih zgradbah zaradi toplotnih mostov predstavlja več kot tretjino vseh transmisijskih toplotnih izgub.

- *Vpliv na toplotno bilanco;* zaradi povečanja toplotnega toka v okolici toplotnih mostov se večajo toplotne izgube in ker je na teh mestih temperatura nižja, se prične kondenzacija vodne pare. Pojavi se potreba po večkratnem prezračevanju in povišani temperaturi v prostoru. Posledica je bistveno večja potrošnja energije za segrevanje.
- *Vpliv na bivalno okolje;* zaradi znižanja notranje temperature na steni (pozimi nižja od rosišča) pride do kondenzacije vodne pare in postopoma do pojava plesni. Posledica tega je estetska in tudi materialna škoda. Prav tako pa lahko pri občutljivejših ljudeh pride do zdravstvenih težav.

#### **2.4. Toplotni mostovi pri vgradnji oken**

Pri pasivnih in nizkoenergetskih stavbah je najpomembnejša zrakotesnost, ki je znak kvalitete in ima velik vpliv na toplotno ugodje ter zvočno zaščito. Kjerkoli je ovoj prekinjen, se pojavi toplotni most. Paziti je potrebno predvsem na konvekcijske toplotne mostove zaradi tesnjenja. Problem tesnitve se pojavi pri vseh priključkih gradbenih elementov, pri prebojih ovoja zgradbe in pri stikih stavbnega pohištva s steno.

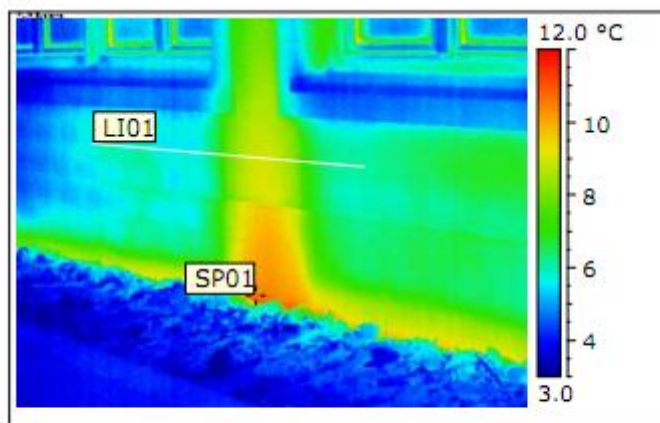
Posebna pozornost bo namenjena stiku okenskega podboja s steno. Zaščititi je potrebno tako zunanjo kot notranjo stran stičišča okenskega podboja in zidu. Na zunanji strani moramo zagotoviti zaščito pred hrupom, meteornimi vodami, kondenzacijo vlage in vplivi temperaturnih sprememb, na notranji strani pa pred zračno vlago. Ta način izolacije predvidevajo tudi nove RAL-smernice, ki zahtevajo troslojno izvedbo vgradnje stavbnega pohištva. Gre za tesnjenje reg po principu »znotraj bolj tesno kot zunaj« ali natančneje, na notranji strani se tesni s paroprepustno oviro, na zunanji s parodifuzno oviro in na sredini s toplotno in zvočno izolacijo. Brez upoštevanja teh smernic prihaja do dveh večjih problemov. PU-montažna pena, s katero se vgrajuje stavbno pohištvo, se običajno navlaži in po tem ne služi več svojemu namenu toplotne izolativnosti, saj mokre toplotne izolacije nimajo tako velike toplotne upornosti kot suhe. Drug problem se pojavi zaradi različnih materialov, iz katerih so izdelana okna. Vsi materiali se zaradi vpliva temperatur sčasoma spreminjajo in premikajo, čemur pa PU-montažna pena ne more slediti, in v takih primerih lahko pride do odstopanja pene od konstrukcije. Posledica tega je prehod zraka oz. prepil [7].

## 2.5. Termografija

Termografija je ustaljen način prikaza distribucije površinske temperature na opazovanem objektu, s pomočjo katerega analiziramo nekatere lastnosti tega objekta, ki sicer navzven niso vidne. Najhitrejši grafični prikaz porazdelitve površinskih temperatur dobimo z uporabo termokamere, ki za oko nevidno infrardeče sevanje telesa spremeni v barvno sliko [12].

Termokamera poda podoben rezultat, kot ga bomo mi dosegli s pomočjo analize z izbranim programom AnTherm. Z njim lociramo vroče točke na izbrani stavbi, ker le-te običajno kažejo na napake v materialu ali izgradnji.

Uporaba kamere se je pričela po letu 1965, vendar se je njena masovna uporaba pričela nekaj desetletij kasneje. Pred tem so se vroče točke iskale na izjemno dolgotrajen način, s pomočjo kontaktnih termometrov v izbranih točkah. Nato se je izdelala grafična podoba. Ta način dandanes ni več primeren.



Termogram v izbrani barvni paleti (vir: **ZAG**, Ljubljana)

Slika 5: Rezultat dela s topografsko kamero [12].

### **3. STANDARDI**

Standard za izračun toplotnih mostov daje več različnih načinov izračuna toplotnega toka skozi konstrukcijo in površinskih temperatur.

SIST EN ISO 10211 je namenjen izračunu toplotnih mostov na ovoju zgradbe. Obravnava področje toplotnih tokov in spremembe površinskih temperatur. Toplotni most običajno povzroča tri- ali dvodimenzionalni toplotni tok, ki ga lahko natančno določimo z uporabo numeričnih metod, opisanih v tem standardu.

V veliko primerih (predvsem, če je konstrukcija konstantna v eni smeri) lahko uporabimo dvodimenzionalni toplotni tok in ob tem dobimo dovolj dobre rezultate.

Obstajajo tudi druge nenumerične metode, opisane v standardu ISO 14683, s katerimi je možno določiti toplotne izgube dovolj natančno.

SIST EN ISO 10211 je v svojih zametkih predvideval dve različni metodi za izračun tri- oz. dvodimenzionalnih problemov, vendar te delitve nov standard iz leta 2008 ne omenja več.

#### **3.1. Področje uporabe**

Standard določa specifikacije za tri- in dvodimenzionalni geometrijski model toplotnega mostu za izračun:

- toplotnega toka, da bi ocenili vse toplotne izgube stavbe oz. njenega dela;
- minimalne površinske temperature, da bi ocenili nevarnost kondenzacije.

Ves standard temelji na naslednjih predpostavkah:

- vse fizikalne lastnosti konstrukcije so neodvisne od temperature;
- v konstrukcijskih elementih ni virov toplote.



### 3.2. Načela uporabe

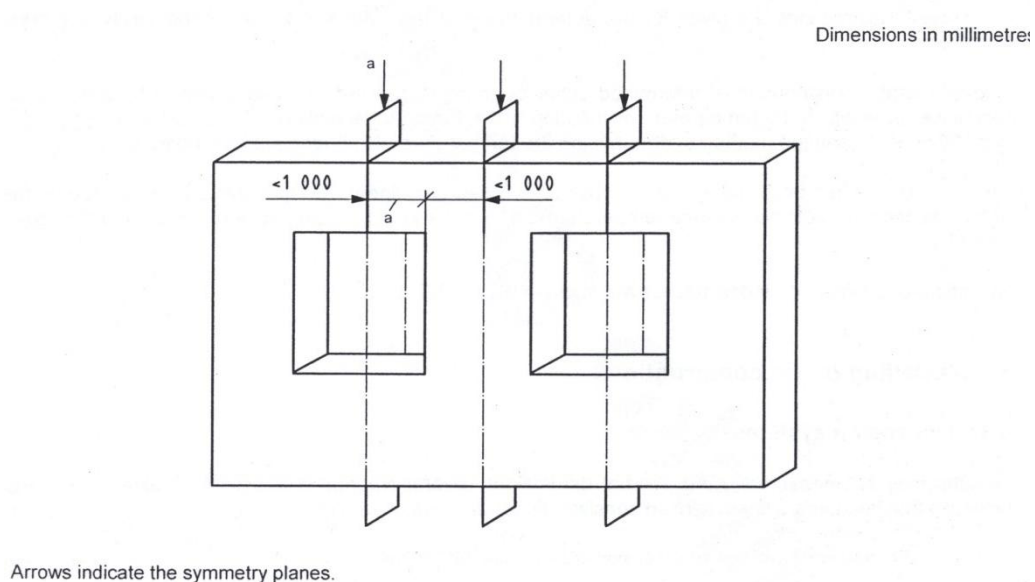
Standard je v nadaljevanju razdeljen na tri poglavja oz. klavzule.

Klavzula 5 opisuje pravilo modeliranja konstrukcije. Vsak sloj oz. material mora imeti enakomerno (homogeno) toplotno prevodnost, da je izračun pravilen. Običajno ni mogoče zgolj z enim modelom opisati in izračunati celotne stavbe, zato je potrebno stavbo razdeliti na več delov. To lahko naredimo z »razdelilnimi« ravninami, vendar moramo pri tej delitvi paziti, da ne pride do razlik v rezultatih med izračunom celotne stavbe in razdeljenih delov.

Standard podaja nekaj pravil za postavitev razdelilnih ravnin, in sicer:

- kot simetrijska ravnina, če je ta manj kot  $d_{\min}$  od osrednjega elementa;
- vsaj  $d_{\min}$  od centralnega elementa, če bližje ni simetrične ravnine;
- v sloju zemljine tik pod konstrukcijo (glej tabelo 1 v poglavju 5.2.4.);

pri čemer je  $d_{\min}$  en meter oz. trikratna vrednost debeline izbranega spremljajočega elementa.



Slika 6: Prikaz simetričnih ravnin, ki jih lahko uporabljamo kot razdelilne ravnine [15]

Večkrat se v konstrukcijah pojavljajo tudi sloji, ki nimajo konstantnega prereza ali toplotne prevodnosti (zaradi raznih zračnih odprtin, distančnikov, instalacijskih cevi). V tem poglavju je zato predpisan postopek poenostavitve geometrijskega modela. Podpoglavje 5.3.2. opisuje način spremembe geometrijskega modela glede na toplotno prevodnost sosednjih elementov. V podpoglavju 5.3.3. najdemo uporabo kvazihomogenih elementov ali materialov za poenostavitev modela. Pri tem moremo paziti na naslednje pogoje:

- nehomogene plasti se nahajajo na delu konstrukcije, ki po poenostavitvi postane stranski element;
- toplotna prevodnost kvazihomogene plasti po poenostavitvi ni več kot 1,5-krat večja od najmanjše toplotne prevodnosti materialov, predstavljenih v tem sloju pred poenostavitvijo.

Podani sta dve enačbi za izračun toplotne prevodnosti kvazihomogenih elementov:

a) Izračun za pridobitev koeficienta toplotne sklopitve:

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{A}{L_{3D}} - R_{si} - R_{se} - \sum \frac{d_j}{\lambda_j}}, \quad (3.1)$$

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{l_{tb}}{L_{2D}} - R_{si} - R_{se} - \sum \frac{d_j}{\lambda_j}}, \quad (3.2)$$

kjer je:

- $d$  debelina dela s spremenljivo toplotno prevodnostjo;
- $A$  površina izbranega dela;
- $l_{tb}$  dolžina linearnega toplotnega mostu;
- $L_{3D}$  koeficient toplotne sklopitve delov konstrukcije določen s 3D-izračunom;
- $L_{2D}$  koeficient toplotne sklopitve delov konstrukcije določen z 2D-izračunom;
- $d_j$  debelina vsake homogene plasti v konstrukciji;
- $\lambda_j$  toplotna prevodnost vsake homogene plasti v konstrukciji.

b) Izračun za pridobitev notranje površinske temperature ali linearni toplotni prehod,  $\psi$ , ali točkovni toplotni prehod,  $\chi$ :

$$\lambda_l = \frac{(\lambda_1 A_1 + \dots + \lambda_n A_n)}{(A_1 + \dots + A_n)}, \quad (3.3)$$

kjer je:

$\lambda_1 \dots \lambda_n$  toplotne prevodnosti konstrukcijskih materialov;

$A_1 \dots A_n$  površina konstrukcijskega materiala izmerjena v ravnini plasti,

pod pogojem da:

- so obravnavani toplotni mostovi pravokotni (ali skoraj pravokotni) na notranje ali zunanje površine konstrukcije in preдреjo plast po vsej dolžini;
- je toplotna upornost konstrukcijskih elementov po poenostavitvi vsaj  $1,5 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$ ;
- so pogoji za vsaj eno od skupin navedenih na sliki 7 izpolnjeni.

Group <sup>a</sup>	$\lambda_{tb}$ <sup>b</sup> W/(m·K)	$A_{tb}$ <sup>c</sup> m <sup>2</sup>	$R_0$ <sup>e</sup> m <sup>2</sup> ·K/W	$R_{t,i}$ <sup>f</sup> m <sup>2</sup> ·K/W	$\lambda_i$ <sup>g</sup> W/(m·K)	$d_i$ <sup>h</sup> m
1	≤ 1,5	≤ 0,05 × $l_{tb}$ <sup>d</sup>	≤ 0,5	—	—	—
2	> 3	≤ 30 × 10 <sup>-6</sup>	≤ 0,5	—	—	—
3	> 3	≤ 30 × 10 <sup>-6</sup>	> 0,5	≥ 0,5	—	—
4	> 3	≤ 30 × 10 <sup>-6</sup>	> 0,5	< 0,5	≥ 0,5	≥ 0,1

NOTE 1 Group 1 includes linear thermal bridges. Examples are joints in masonry, wooden battens in air cavities or in insulated cavities of minor thickness.

NOTE 2 Group 2 includes such items as wall-ties, insofar as they are fitted in masonry or concrete or are located in an air cavity, as well as nails and screws in layers of material or strips with the indicated maximum thermal resistance.

NOTE 3 Groups 3 and 4 include such items as cavity ties, insofar as they penetrate an insulation layer which has a higher thermal resistance than that indicated for group 2. The inner leaf therefore needs to have thermal properties that limit the influence of the thermal bridge on the internal surface temperature, e.g. if the inner leaf has a sufficient thermal resistance (group 3) or the thermal conductivity of the inner leaf is such that the heat flow through the cavity ties is adequately distributed over the internal surface; most masonry or concrete inner leaves are examples of group 4.

<sup>a</sup> See Figure 13.

<sup>b</sup>  $\lambda_{tb}$  is the thermal conductivity of the thermal bridge to be incorporated into the quasi-homogeneous layer.

<sup>c</sup>  $A_{tb}$  is the area of the cross-section of the thermal bridge.

<sup>d</sup>  $l_{tb}$  is the length of a linear thermal bridge.

<sup>e</sup>  $R_0$  is the thermal resistance of the layer without the presence of the point thermal bridge.

<sup>f</sup>  $R_{t,i}$  is the total thermal resistance of the layers between the quasi-homogeneous layer considered and the internal surface.

<sup>g</sup>  $\lambda_i$  is the thermal conductivity of the material layer between the quasi-homogeneous layer considered and the internal surface with the highest value of  $\lambda_i \cdot d_i$ .

<sup>h</sup>  $d_i$  is the thickness of the same layer.

Slika 7: Slika tabele skupin toplotnih mostov.

Porazdelitev temperature v konstrukciji in toplotni tok skozi lahko izračunamo, če so poznani robni pogoji. V klavzuli 6 so dana navodila za določitev toplotne prevodnosti in robnih pogojev. Podano je, kako določiti robne temperature, toplotne prevodnosti različnih zračnih odprtih in temperaturo stene v primeru neogrevane sobe.

Porazdelitev temperature se določi z uporabo bodisi iterativnega izračuna bodisi neposredne tehnike, po kateri se porazdelitev temperature v celicah materiala določi z interpolacijo. Pravila za izračun in metode določanja temperatur porazdelitve so napisana v klavzuli 7.

Vse metode računanja morajo zadostovati pogojem, zapisanim v prilogi A.

Osmo poglavje standarda podaja način izračuna koeficienta toplotne sklopitve in toplotni pretok s 3D-izračunom. Poglavje je razdeljeno glede na število robnih pogojev (temperatur).

V primeru, da računamo zgolj z dvema okoljema z različnima temperaturama in je celotna stavba računana tridimenzionalno z enim modelom, lahko koeficient toplotne sklopitve izračunamo kar iz toplotnega toka med prostoroma:

$$\Phi = L_{3D,1,2} (\theta_1 - \theta_2), \quad (3.4)$$

kjer je:

- $\Phi$  toplotni tok,
- $L_{3D,1,2}$  koeficient toplotne sklopitve med prostoroma,
- $\theta_{1,2}$  temperatura prostora.

Drugi primer predstavlja podobno situacijo kot zgoraj naveden, le da je v tem primeru stavba razdeljena na več delov, vendar imamo še vedno zgolj dve robni temperaturi.

$$L_{3D,i,j} = \sum_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \cdot A_k + \sum_{m=1}^{N_m} L_{2D,m(i,j)} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{N_n} L_{3D,n(i,j)}, \quad (3.5)$$

kjer je:

- $L_{3D,n(i,j)}$  koeficient toplotne sklopitve pridobljen iz 3D-izračuna za n-ti del zgradbe;

$L_{2D,m(i,j)}$	koeficient toplotne sklopitve pridobljen iz 2D-izračuna za m-ti del zgradbe;
$l_m$	dolžina dela, kjer se pojavlja $L_{2D,m(i,j)}$ ;
$U_{k(i,j)}$	toplotna prehodnost, pridobljena iz 1D-izračuna za k-ti del stavbe;
$A_k$	območje, na katerem se uporablja $U_{k(i,j)}$ ;
$N_n$	število 3D-delov;
$N_m$	število 2D-delov;
$N_k$	število 1D-delov.

Standard v podpoglavju 8.3 predstavi primer z več kot dvema robnima temperaturama.

V tem primeru lahko posebej izračunamo toplotni tok skozi posamezno steno ( $\Phi_{i,j}$ ) ali skupen toplotni tok ( $\Phi$ ).

$$\Phi_{i,j} = L_{3D,i,j} (\theta_i - \theta_j), \quad (3.6)$$

$$\Phi = \sum_j [L_{3D,i,j} (\theta_i - \theta_j)], \quad (3.7)$$

kjer je:

$L_{3D,i,j}$	koeficienti toplotne sklopitve med sosednjimi sobami ali zunanostjo;
$\theta_j$	temperature sosednjih sob ali zunanosti.

Skupen toplotni tok lahko izračunamo tudi po enačbi:

$$\Phi = \sum_i \sum_j [L_{3D,i,j} (\theta_i - \theta_j)], \quad (3.8)$$

kjer je:

$\theta_i$	temperatura notranjih sob;
$\theta_j$	temperatura zunanjih sob;
$L_{3D,i,j}$	pripadajoči koeficient toplotne sklopitve.

V poglavju 9 so podane enačbe za izračun koeficienta toplotne sklopitve, linearnega toplotne prehoda in točkovnega toplotnega prehoda.

$$L_{3D,i,j} = \sum_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \cdot A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \psi_{m(i,j)} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_{n(i,j)}, \quad (3.9)$$

kjer je:

$L_{3D,n(i,j)}$	koeficient toplotne sklopitve;
$A_k$	območje, na katerem se uporablja $U_{k(i,j)}$ ;
$\psi_{m(i,j)}$	linearni toplotni prehod na m-tem delu zgradbe;
$l_m$	dolžina dela, kjer se pojavlja $\psi_{m(i,j)}$ ;
$\chi_{n(i,j)}$	točkovna toplotna prehodnost n-tega dela zgradbe;
$N_n$	število delov, kjer se pojavlja linearni toplotni most;
$N_m$	število delov, kjer se pojavlja točkovni toplotni most.

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j, \quad (3.10)$$

kjer je:

$L_{2D}$	koeficient toplotne sklopitve, pridobljen iz 2D-izračuna za komponente, ki delijo dve obravnavani okolji;
$U_j$	toplotni prehod enodimenzionalnega dela j, ki ločuje dve okolji;
$l_j$	dolžina, po kateri poteka $U_j$ .

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j \cdot l_j, \quad (3.11)$$

kjer je:

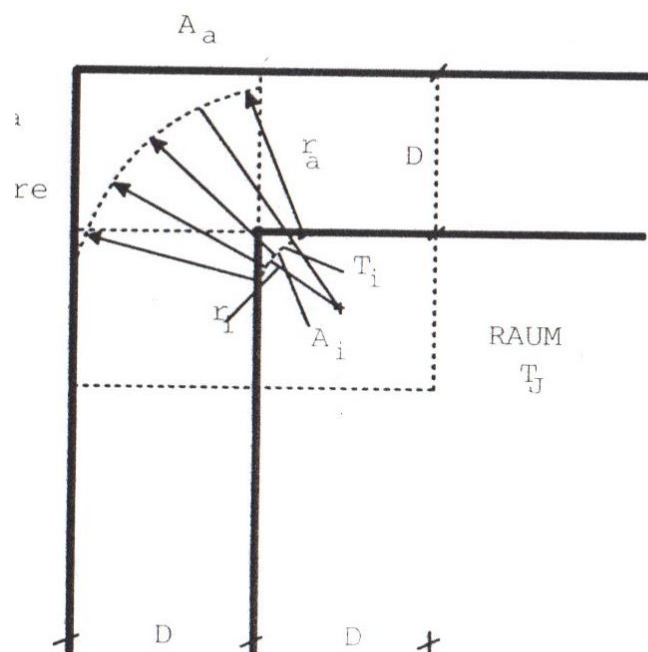
$L_{3D}$	koeficient toplotne sklopitve za 3D elemente;
$U_i$	koeficient toplotne prehodnosti enodimenzionalnega dela i, ki ločuje dve okolji;
$A_i$	površina, na kateri se pojavlja $U_i$ ;
$\psi_j$	koeficient linijske toplotne prehodnosti, izračunan po enačbi 3.10;
$l_j$	dolžina, po kateri poteka $\psi_j$ ;
$N_j$	število dvodimenzionalnih delov;
$N_i$	število enodimenzionalnih delov.

Pri uporabi zgornjih dveh enačb za  $\psi$  in  $\chi$  moramo predhodno določiti pozicijo izračuna, torej, ali računamo za notranjo ali zunanjo stran stene.

Kot vidimo, lahko z nekaj podatki o konstrukciji izračunamo toplotni most s pomočjo enačb iz standardov, vendar moramo vedeti, da se nekaterih koeficientov ne da z lahkoto izračunati. Na primer  $L_{2D}$ -koeficient toplotne sklopitve lahko dobimo samo s pomočjo računalniškega programa.

V poglavju 10 so podane podobne enačbe kot zgoraj, vendar so vse namenjene 2D-izračunom. Podrobneje je opisan tudi izračun toplotnega mostu na stiku tla-stena.

Kot zelo zanimiva in uporabna se izkaže tudi knjiga avtorja Gerharda Hilbiga *Grundlagen der Bauphysik*. V njej se nahaja primer izračuna površinske temperature v primeru stika dveh pravokotnih sten [10], kjer temperaturno polje ni več enodimenzionalno, kot smo ga vedno obravnavali, ampak je vsaj dvo- ali večdimenzionalno. Spodaj je predstavljen zelo enostaven in hiter izračun notranje robne temperature. Na ta način bi lahko v primeru, ko ne bi imeli potrebne programske opreme, izračunali temperaturo na kritičnih točkah.



1: Geometrische Wärmebrücke

Slika 8: Primer geometrijskega dvodimenzionalnega toplotnega mostu

Potegnemo mejo D (predstavlja mejo debeline štirih kvadratov). V središču spodnjega desnega kvadrata postavimo center, iz katerega potegnemo radij do zunanega in notranjega valja.

Skozi zunanjo površino cilindra  $A_a$  teče toplotni tok velikosti:

$$Q_a = A_a \alpha_a (T_a - T_A) = \frac{1}{4} 2\pi r_a L \alpha_a (T_a - T_A) \quad (3.12)$$

in skozi notranjo površino  $A_i$ :

$$Q_i = A_i \alpha_i (T_a - T_i) = \frac{1}{4} 2\pi r_i L \alpha_i (T_a - T_i). \quad (3.13)$$

Porazdelitev temperature za lupino valja:

$$T(r) = c_1 \ln r + c_2. \quad (3.14)$$

Tako je za zunanjo površino  $A_a$ :

$$T_a = c_1 \ln r_a + c_2 \quad (3.15)$$

in za površino  $A_i$ :

$$T_i = c_1 \ln r_i + c_2 \quad (3.16)$$

Razlika zgornjih dveh enačb (3.15 in 3.16) nam da:

$$T_i - T_a = c_1 \ln \frac{r_i}{r_a}. \quad (3.17)$$

Gostota toplotnega toka se izračuna po enačbi:

$$q = -\lambda T_r = -\lambda c_1 \frac{1}{r}, \quad (3.18)$$

$$q = -\lambda \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_i}{r_a}} \frac{1}{r}.$$

(3.19)

Sedaj ponovno napišemo enačbo za toplotni tok, vendar v drugi obliki:

$$Q = qA = -\frac{1}{4} 2\pi L \lambda \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_i}{r_a}} \frac{1}{r}. \quad (3.20)$$

V primeru stacionarnega problema mora veljati  $Q_a = Q_i = Q$ , kar da:

$$r_i \alpha_i (T_a - T_i) = \lambda \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_i}{r_a}} \quad (3.21-1)$$



in

$$r_a \alpha_a (T_a - T_A) = \lambda \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_a}{r_i}}. \quad (3.21-2)$$

To sta enačbi z neznanima temperaturama na zunanji in notranji površini. Vpeljemo Biotovo število:

$$Bi(T_\exists - T_i) = \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_a}{r_i}}, \quad (3.22-1)$$

$$Ba(T_a - T_A) = \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_a}{r_i}}. \quad (3.22-2)$$

vstavimo:  $\hat{Bi} = Bi \ln \frac{r_a}{r_i}$  in  $\hat{Ba} = Ba \ln \frac{r_a}{r_i}$ ,

$$\hat{Bi}T_\exists = (1 + \hat{Bi})T_i - T_a, \quad (3.23-1)$$

$$\hat{Ba}T_A = (1 + \hat{Ba})T_a - T_i. \quad (3.23-2)$$

Izpostavimo  $T_a$  (3.23-2) in vstavimo v drugo (3.23-1) enačbo, tako da dobimo preprosto enačbo za izračun robne notranje temperature:

$$\hat{Ba}T_A + \hat{Bi}(1 + \hat{Ba})T_\exists = [(1 + \hat{Bi})(1 + \hat{Ba}) - 1]T_i. \quad (3.24)$$

V tem poglavju se nahajajo enačbe, ki nas nekoliko usmerijo v razumevanje postopkov izračuna toplotnega mostu, porazdelitve površinske temperature ter toplotnega toka.

#### 4. PROBLEMATIKA

Standardi dandanes narekujejo zelo natančne izračune vseh možnih toplotnih izgub. To je nujno zaradi vedno večjega onesnaževanja zraka s pretiranim ogrevanjem stanovanj in zaradi rasti cen elektrike, olja in plina.

V tej diplomski nalogi rešujemo problem toplotnih mostov dveh variant vgradnje oken. Prva varianta predstavlja vgradnjo oken brez žaluzij ali rolet, pri kateri lahko preizkušamo različne variante pozicije okna glede na steno.

Druga varianta je največkrat uporabljen sistem zunanjih aluminijastih skritih žaluzij. Večina ljudi se pri oknih odloči tudi za uporabo določenih senčil. Izbira se med roletami in različnimi vrstami žaluzij. Tako rolete kot tudi zunanje žaluzije imajo škatlo, v kateri so zвите oz. zložene v času, ko se ne uporabljajo. Te škatle so lahko na notranji strani vgrajene kar skupaj z okni, imenovane tudi nadokenske rolete ali žaluzije. Le-te imajo škatlo vidno v sobi, kjer je tudi servisna odprtina. Tiste na zunanji strani lahko vgradimo z vidno (predokenske rolete ali žaluzije) ali skrito škatlo (podometne žaluzije ali rolete). Naš primer obravnava slednjo situacijo.



Slika 9: Predstavljena so primeri zgoraj omenjenih rolet. Prva iz leve je nadokenska roleta, nato sledi predokenska in zadnja slika predstavlja podometno roletno [11].

## 5. TOPLOTNA ANALIZA S PROGRAMOM ANTHERM

### 5.1. O programu

AnTherm je zmogljiv program, ki se uporablja za toplotno analizo zgradbe in njenih elementov, za izračun toplotnih mostov in področij večje kondenzacije vlage. Izračuna toplotni tok ali tok difuzije vodne pare v konstrukciji. Poda kritične točke rosišča in delni tlak hlapov v notranjosti konstrukcije.

Program torej poda:

- stacionarni in prehodni izračun toplotne porazdelitve po komponentah v dvo- in tridimenzionalnih primerih;
- samodejni izračun matrike koeficientov toplotne sklopitve  $L_{2D}$  in  $L_{3D}$ ;
- izračun linearne toplotne prehodnosti  $\psi$ ;
- izračun toplotne uteži (g) v najhladnejši točki prostora;
- izračun kritične točke vlažnosti konstrukcije (rosišče) na površinah vseh delov konstrukcije;
- izračun in predstavitev delnih parnih tlakov ter kritično točko za kondenzacijo v primerjavi z nasičenim parnim tlakom;
- obsežno tridimenzionalno grafično oceno (vizualizacijo).

Program je primeren za detajlne izračune (okenski okvirji, fasadne konstrukcije) in za obsežne izračune celotnih stavb.

AnTherm je v celoti izdelan v skladu s standardi SIST EN ISO 10211.

## 5.2. Teoretično ozadje programa

Izračuni toplotnih polj in toplotnih tokov temeljijo na splošnem konceptu rešitev in koeficientu toplotne sklopitve.

Program AnTherm je razvit za izračun gradbenih elementov, katerih meje so vzporedne ravninam kartezičnega koordinatnega sistema. Po zaslugi omejitev na ortogonalno mrežo je omogočen hiter vnos konstrukcijskih elementov v obliki pravokotnikov, ki se lahko med seboj tudi prekrivajo. Omejitev na pravokotne strukture omogoča razdelitev na relativno fine delce pri izračunu porazdelitve temperature. Program omogoča simulacijo 20 000 celicam in 80 000 vozliščem (vsaka celica nima vozlišča zgolj na sredini, ampak tudi ob robovih) v dvodimenzionalnih primerih in 160 000 vozlišč v tridimenzionalnih primerih. Glavna razlika med dvo- in tridimenzionalnimi programi v primerjavi z enodimenzionalnimi je ta, da omogoča več kot dva prostora, kjer podajamo robne pogoje.

Posebnost programa je tudi, da sorazmerno težavnega izračuna toplotne porazdelitve, za katero je potrebna razrešitev velikega sistema linearnih enačb, ni potrebno ponavljati za vsak nabor robnih pogojev. Program sam določi »osnovno rešitev« samo enkrat, ki je potem osnova za temperaturno porazdelitev pri različnih robnih pogojih, kar nam bistveno skrajša čas reševanja problema.

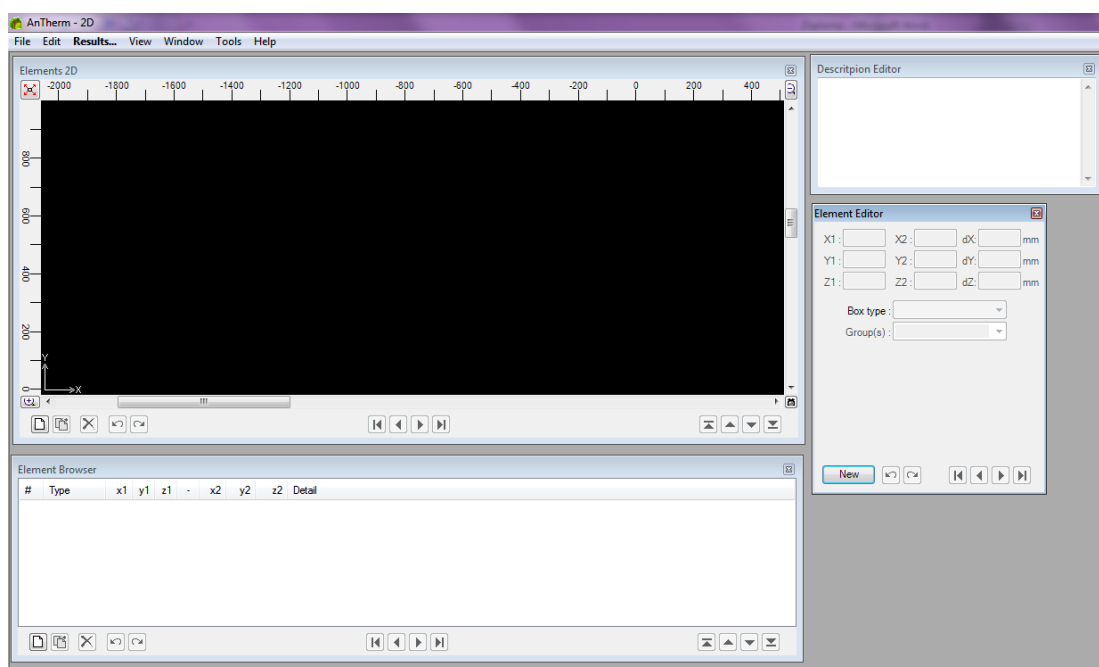
Teoretična podlaga za ta program temelji na izračunih stacionarnega stanja iz knjige *Wärmebrücken* (W. Heindl, 1987) in dinamične analize iz knjige *Zur rechnerischen Erfassung des Einflusses von Wärmebrücken auf das thermische Verhalten von Gebäuden* (K. Kreč, 2000).

Program natančno in direktno izračuna temperaturni faktor  $f_{Rsi}$ , ki se uporablja za tridimenzionalne primere.

### 5.3. Delo s programom

Program AnTherm deluje na enostaven način. Takoj, ko ga zaženemo, se moramo odločiti, ali bomo računali dvo- ali tridimenzionalni primer. Vsi izračunani primeri v tej diplomski so narejeni dvodimenzionalno. Torej, ko izberemo dvodimenzionalni projekt, se pred nami odpre več oken.

*Description Editor* je okno, v katerega vpišemo osnovne informacije o problemu, ki se bodo kasneje pojavile v začetku vseh poročil.

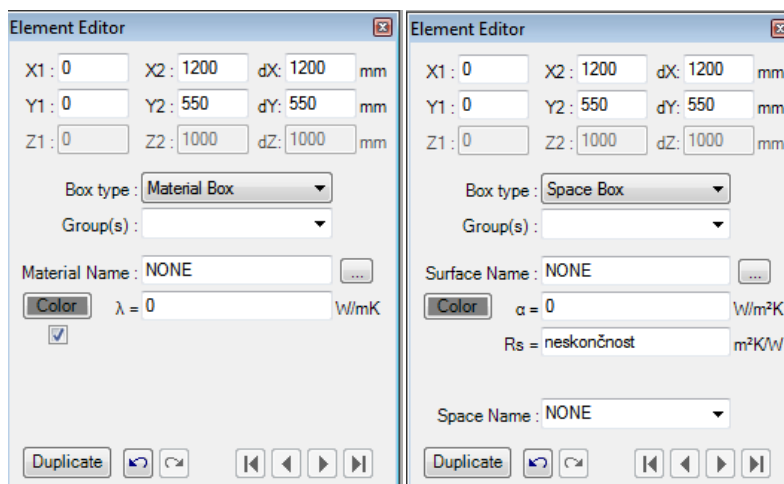


Slika 10: Osnovna okna, ki se odprejo ob zagonu programa

Okno *Elements 2D* grafično prikazuje vse naše vnose v natančnem zaporedju in z možnim prekrivanjem. To okno se prav tako uporablja skupaj z miško in tipkovnico kot interaktivna naprava za urejanje. V tem oknu je možno izbrati element za obdelavo, dodati nove elemente ali spremeniti zaporedje prekrivanja.

Na začetku moramo odpreti tudi okni *Element Editor* in *Element Browser* (v primeru, da se ne odpreta sami). Prvo okno nam omogoča vnos elementov s pomočjo dveh diagonalnih točk pravokotnika. V tem istem oknu nato določimo, ali smo vnesli:

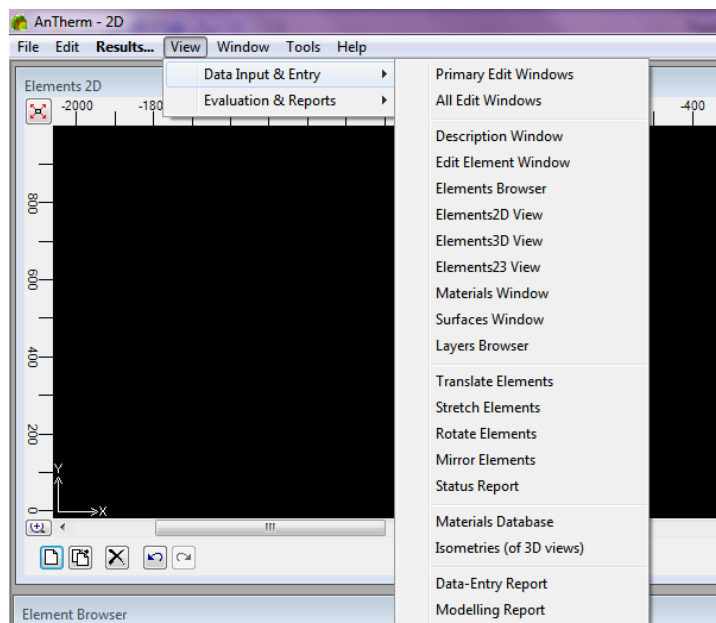
- empty box – prazen prostor,
- material box – vsi konstrukcijski materiali,
- power box – element, ki lahko oddaja ali sprejema toploto in
- space box – soba, napolnjena z zrakom s konstantno temperaturo.



Slika 11: Okno, v katerem določimo dimenzije elementov ter njihove karakteristike

*Element Browser* pokaže seznam vseh dodanih elementov konstrukcije po določenem vrstnem redu prekrivanja. V tem oknu tudi menjujemo vrstne rede zgolj z gumbom prestavi višje ali nižje.

To so tri osnovna okna, potrebna za delo s programom. Nato je možno odpreti in uporabiti še ogromno drugih urejevalnih podoken, ki omogočajo in olajšajo delo.



Slika 12: Prikaz vseh možnih orodij, ki nam pomagajo pri izračunih

Med opisovanjem izračuna problemov bo opisan tudi postopek dela s programom ter vsi potrebni detajli, na katere je potrebno paziti.

#### 5.4. Prvi primer – detajl stene in okenskega okvirja brez žaluzij ali rolet

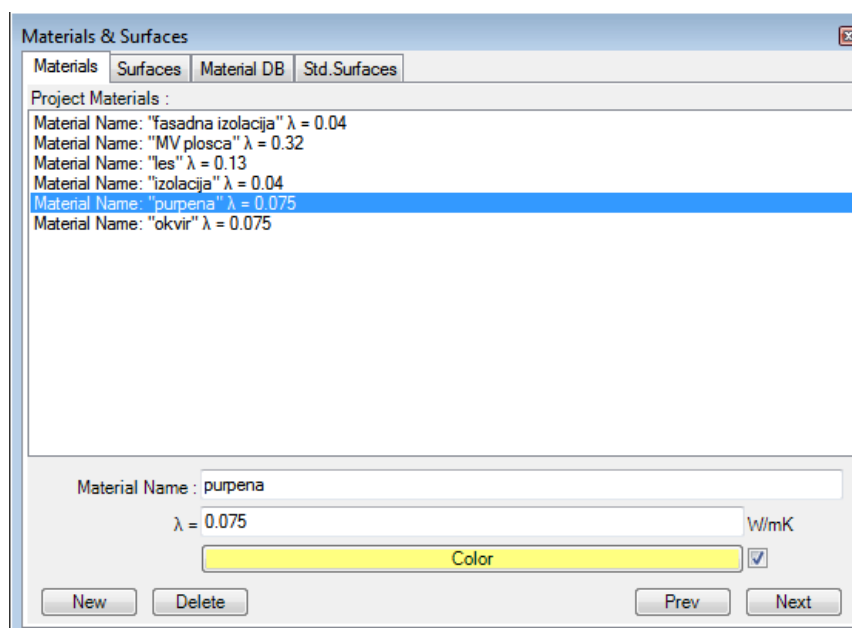
Izračunali bomo vse tri detajle stika stene in okenskega okvirja – spodnji, zgornji in stranski stik. Predvidevamo, da se največji toplotni most pojavi na spodnjem stiku. Le-tam je, glede na načrte, priložene v prilogi, toplotne izolacije tik ob stiku najmanj.

Za začetek si naredimo tabelo materialov in pripadajočih toplotnih prevodnosti, ki se pojavijo v steni. Na toplotno prevodnost snovi vpliva vrsta parametrov, najpomembnejša sta vlažnost in temperatura snovi, medtem ko na toplotno prestopnost na površini gradbene konstrukcije vpliva hitrost gibanja zraka. Toplotna prestopnost  $\alpha$  je odvisna od snovi, ki sprejema ali oddaja toploto, in mehanizma konvektivnega prestopa toplote. Vrednost toplotne prestopnosti  $\alpha$  niha med  $23\text{--}25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  za zunanje dele konstrukcije in  $5\text{--}10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  za notranje dele.

Tabela 1 Seznam materialov in njihovih karakteristik

<i>Material</i>	<i>Toplotna prevodnost [W/mK]</i>	<i>Material</i>	<i>Toplotna prevodnost [W/mK]</i>	<i>Debelina [mm]</i>
MV-plošča	0,320			25
Topl. izolacija	0,040	les	0,130	60
Parna ovira	0,200			0
Topl. izolacija	0,039	les	0,130	160
MV-plošča	0,320			15
Fasadna izolacija	0,040			100
Omet	0,850			5

Za enostavnejše delo s programom vnesemo vse elemente, ki jih želimo uporabiti, v bazo materialov in površin.

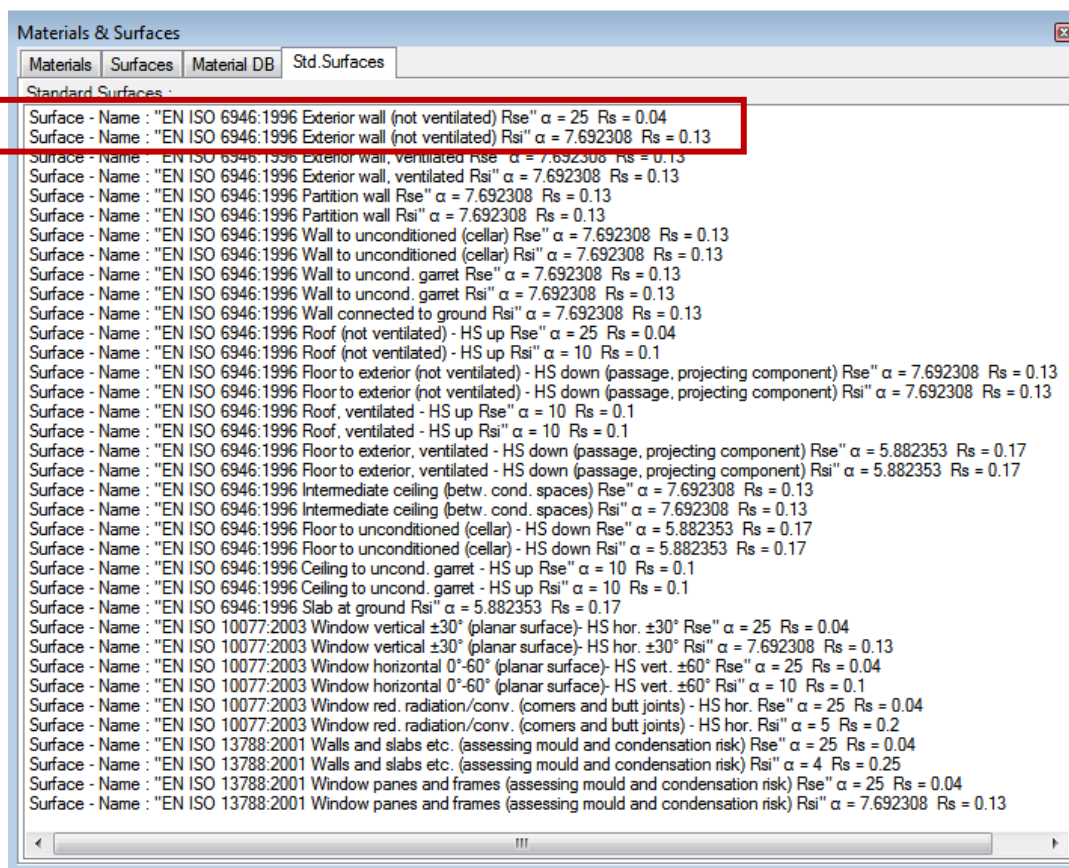


Slika 13: Aplikacija, ki omogoča shranjevanje materialov v bazo podatkov

Prva škatla (*Box*), ki jo moramo vnesti, je zmeraj zunanje okolje. S tem določimo meje okvirja, v katerem bomo delali. Vsi kasnejši vnosi drugih materialov ali prostorov prekrivajo prvega. Zunanje okolje izdelamo tako, da v oknu *Element Editor* določimo dimenzije in izberemo pod zavihkom *Box Type* → *Specac Box*. Nato določimo vrednost

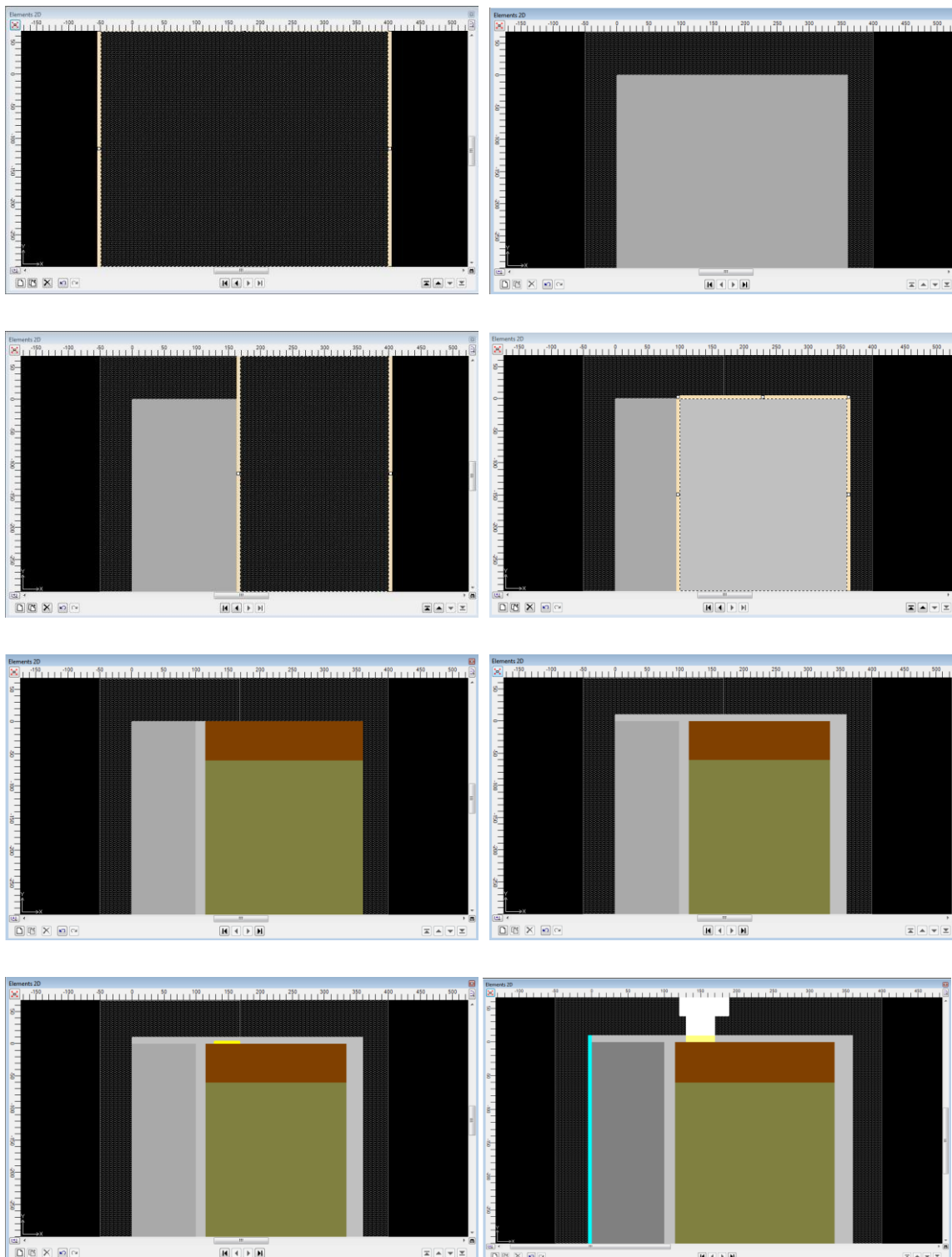


koeficienta  $\alpha$  (toplotna prestopnost). Program omogoča, da vrednost napišemo sami ali izberemo katero izmed možnosti iz knjižnice. V tem primeru je izbrana kar vrednost iz knjižnice za zunanjo steno. Zelo pomembno je, da damo tako zunanji kot notranji sobi ime, saj bosta ti dve sobi predstavljali robni pogoj za temperaturo.



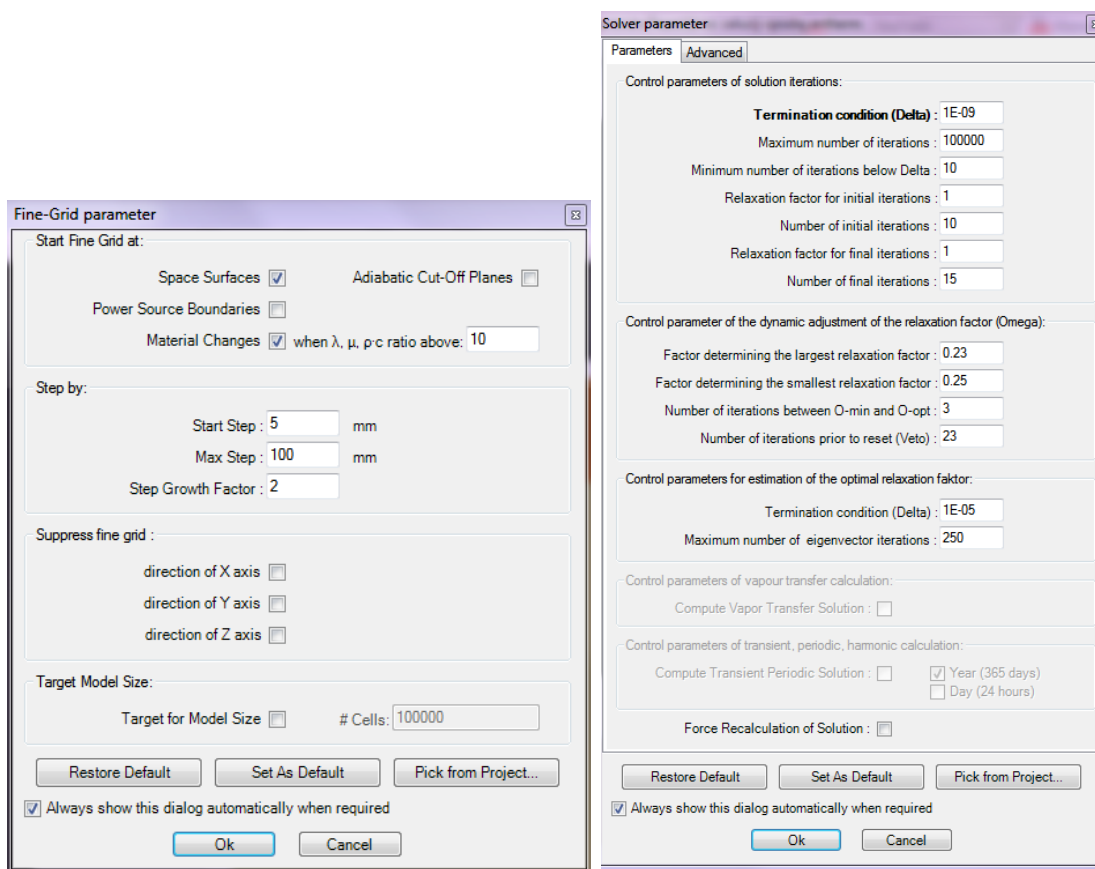
Slika 14: Knjižnica raznih površin, ki kasneje predstavljajo robne pogoje

Nato pričnemo z modeliranjem stika okna in stene – spodaj.



Slika 15: Slike po korakih predstavljajo postopek modeliranja konstrukcije

Potem, ko smo končali z modeliranjem in določanjem karakteristik materialov, lahko zaženemo izračun. Pri tem določimo parametre izračuna.



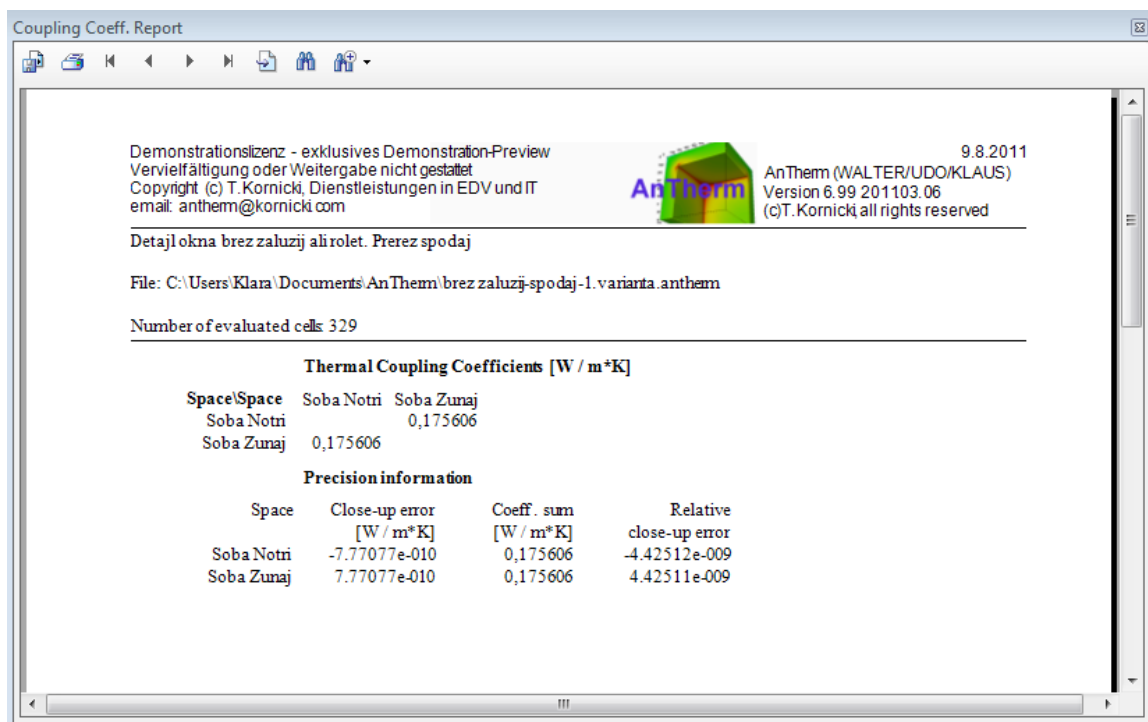
Slika 16: Okno za določitev parametrov pred izračunom

Program izračuna linijski 2D-toplotni most po enačbi:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j. \quad (3.1)$$

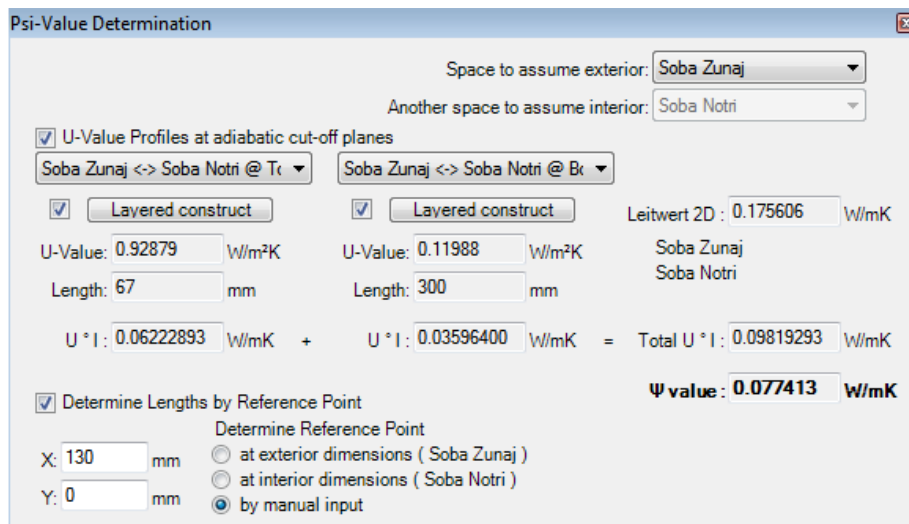
Takoj po zagonu izračuna dobimo matriko koeficienta toplotne sklopitve:

$$L_{2D} = 0,15606 \frac{W}{m K}.$$



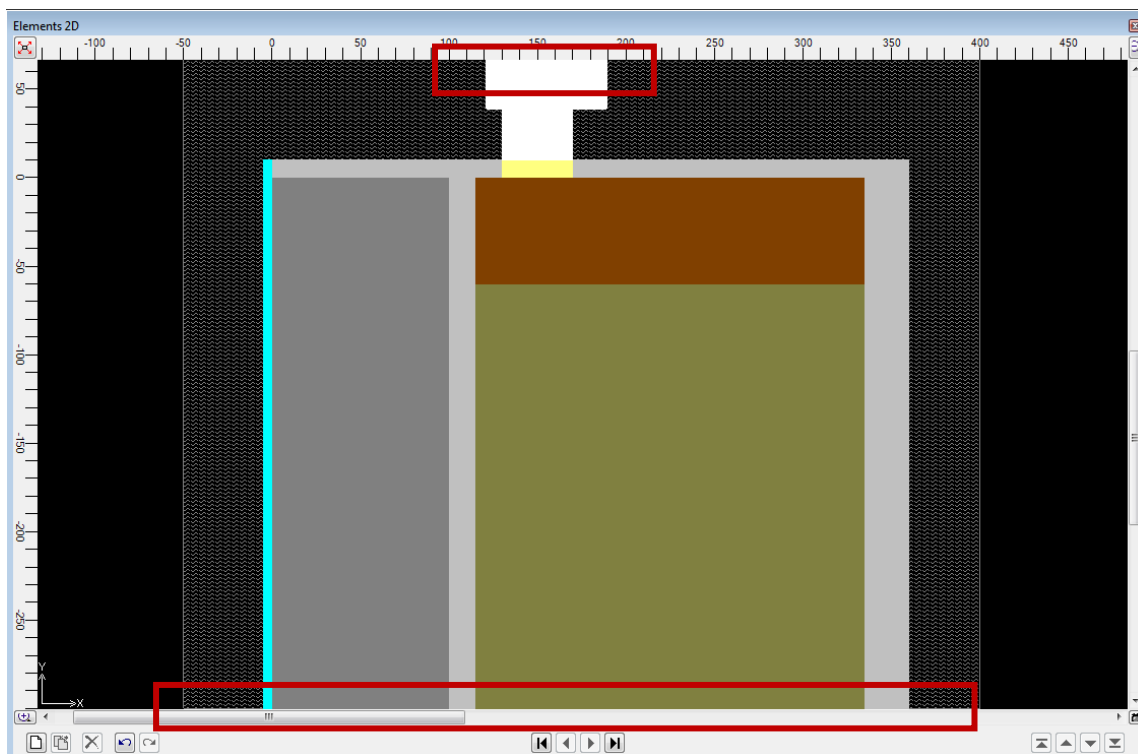
Slika 17: Rezultati izračuna koeficienta toplotne sklopitve

Nato zaženemo aplikacijo za izračun vrednosti  $\psi$  (psi).



Slika 18: Okno, v katerem izračunamo velikost toplotnega mostu ter določamo parametre

Pri tem izračunu se pojavi problem, saj program pri izračunu toplotne prevodnosti ne upošteva deleža lesa. Izračunana je toplotna prevodnost na delu, kjer se postavi meja škatle, ki predstavlja zunanje okolje, kot je prikazano na sliki 17.



Slika 19: Izračun upošteva zgolj dele, obkrožene z rdečim pravokotnikom

Tako je potrebno toplotno prevodnost stene z upoštevanjem deleža lesa izračunati po navodilih, ki jih podaja standard SIST EN ISO 6946: 2008 za vzporedno postavljene elemente.

Skupna toplotna upornost stene se izračuna kot:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se}, \quad (3.2)$$

kjer je:

$R_{si}$  notranja toplotna upornost;

$R_1, R_2 \dots R_n$  toplotna upornost posamezne plasti;

$R_{se}$  zunanja toplotna upornost.

Pojavi se problem, ker te enačbe ne moremo uporabiti za del, kjer se v isti plasti mešata les in izolacija, zato standard ponuja drugo možnost.

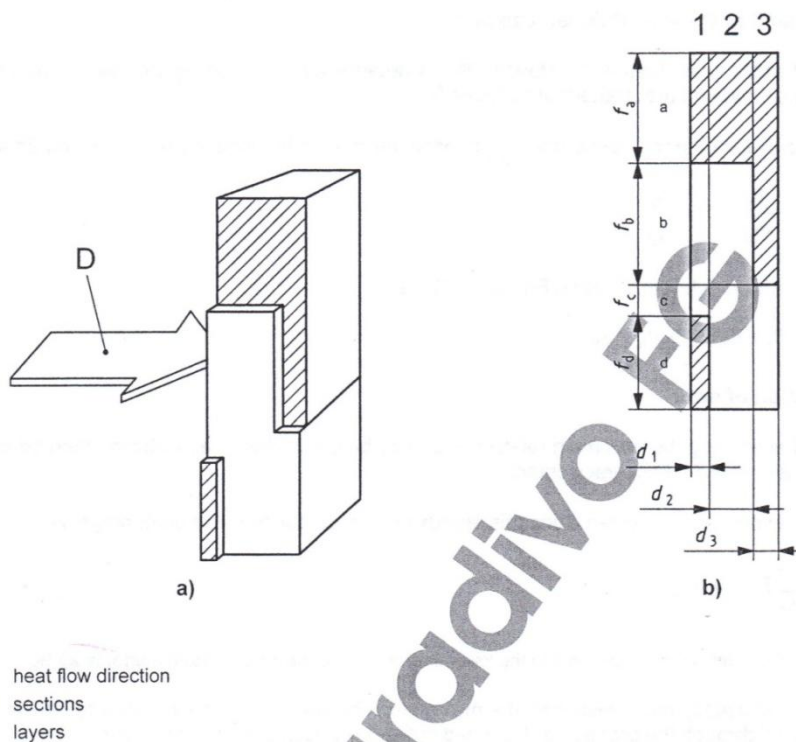


Figure 1 — Sections and layers of a thermally inhomogeneous component

Slika 20: Prikaz potrebne geometrije za izračun [19].

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}, \quad (3.3)$$

kjer:

$R'_T$  predstavlja zgornjo mejo skupne toplotne upornosti sistema, izračunane po enačbi 3.4;

$R''_T$  predstavlja spodnjo mejo skupne toplotne upornosti sistema, izračunane po enačbi 3.5.

Zgornja meja skupne toplotne upornosti sistema:

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}}, \quad (3.4)$$

kjer je:

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$  skupna toplotna upornost posameznega dela, izračunana po enačbi 3.2

$f_a, f_b, \dots, f_q$  odstotni delež vsakega odseka. Seštevek vseh  $f_a + f_b + \dots + f_q = 1$ .

Spodnja meja skupne toplotne upornosti sistema:

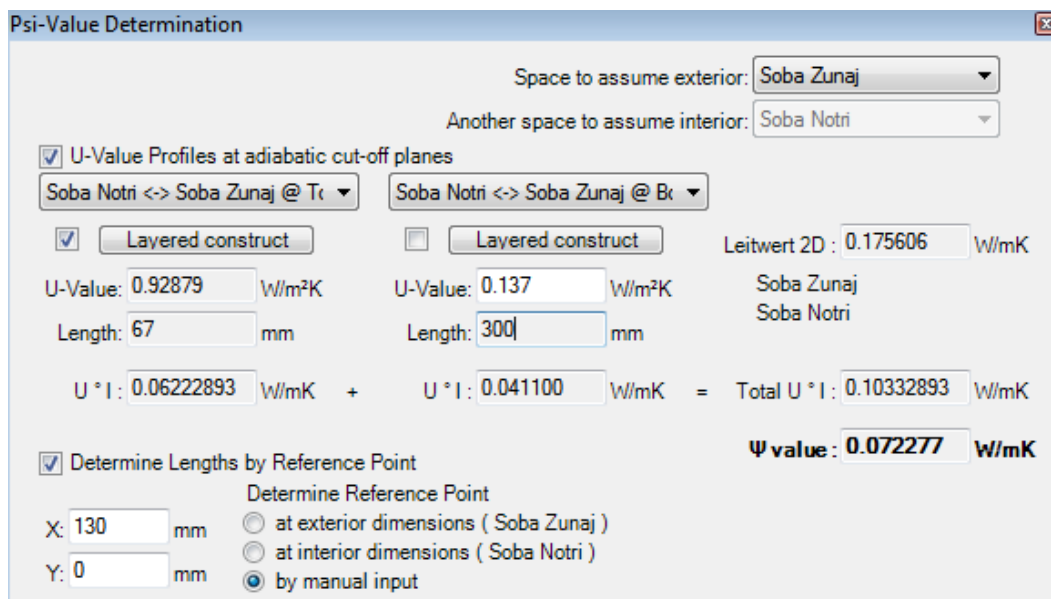
$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (3.5)$$

pri čemer se za vsako plast izračuna toplotna upornost:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}}. \quad (3.6)$$

Ko sledimo tem izračunom, dobimo skupno toplotno prehodnost stene  $U = \frac{1}{R_{TS}} = 0,137 \frac{W}{m^2K}$ .

V primeru, ko to spremenimo, se zmanjša velikost toplotnega mostu na  $\psi = 0,072277 \frac{W}{mK}$ .



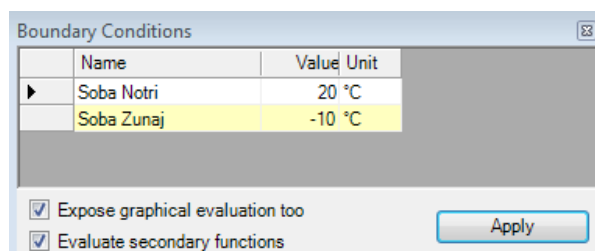
Slika 21: Izračun toplotnega mostu

Toplotni most se pojavi tam, kjer je toplotni upor bistveno manjši kot na ostalih delih. Zaradi tega se poveča gostota toplotnega toka.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{A} \quad (3.7)$$

Enačba velja za enosno prevajanje (Fourjerjev zakon).

Program AnTherm nam po zgoraj izvedenem izračunu ponudi možnost podati robne pogoje vseh obstoječih sob v obliki temperature, kot prikazuje slika spodaj.



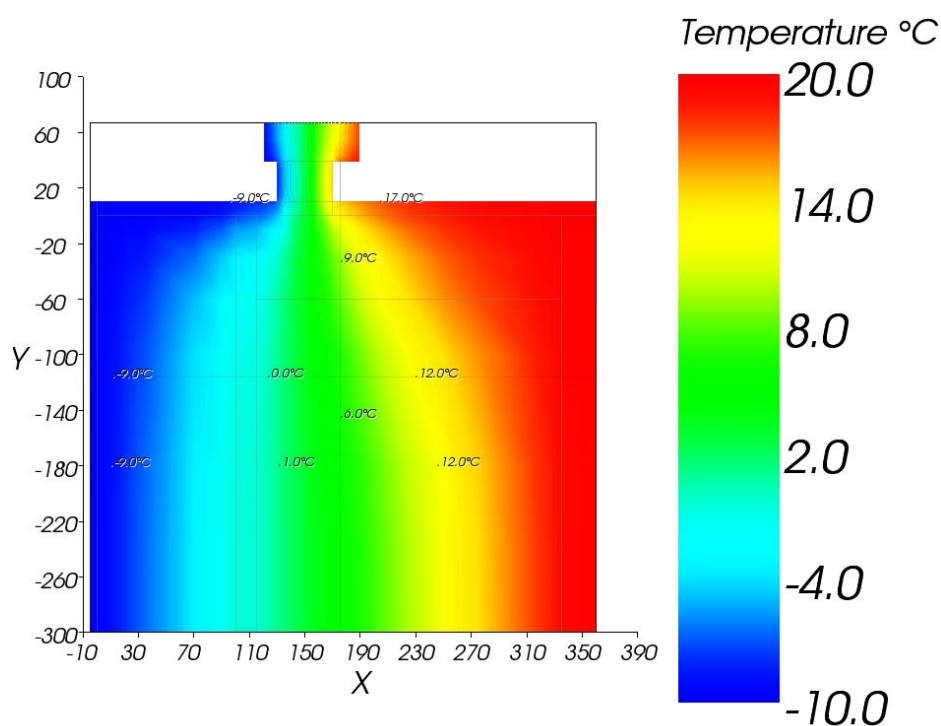
Slika 22: Podajanje robnih pogojev

Skupaj z numeričnimi rezultati, ki jih zahteva EN SIST ISO 10211, program poda tudi vizualno simulacijo izračunanih problemov.



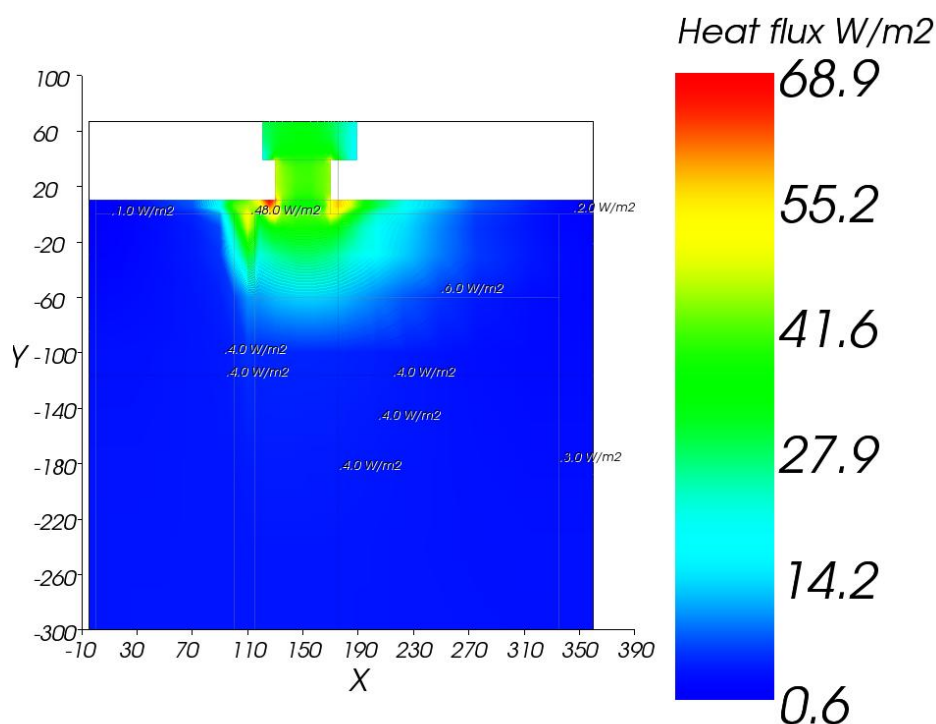
Takoj lahko pogledamo izračunano porazdelitev površinske temperature po konstrukciji v obliki barvne palete ali izolinij (zgolj za dvodimenzionalne modele). Uporabnik ima možnost določiti barvno paleto, razdaljo med izolinijami, začetne in končne vrednosti izolinij ipd. Kasneje je možno tudi izbrati točke, za katere bi radi izvedeli natančno temperaturo in vlažnost. Skupaj z izračunom porazdelitve temperature se izvede tudi izračun specifičnega toplotnega toka, relativne vlažnosti in faktorja g (utežni faktor sobe).

Vizualni rezultati našega primera:



AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 23: Prikaz porazdelitve temperature po konstrukciji



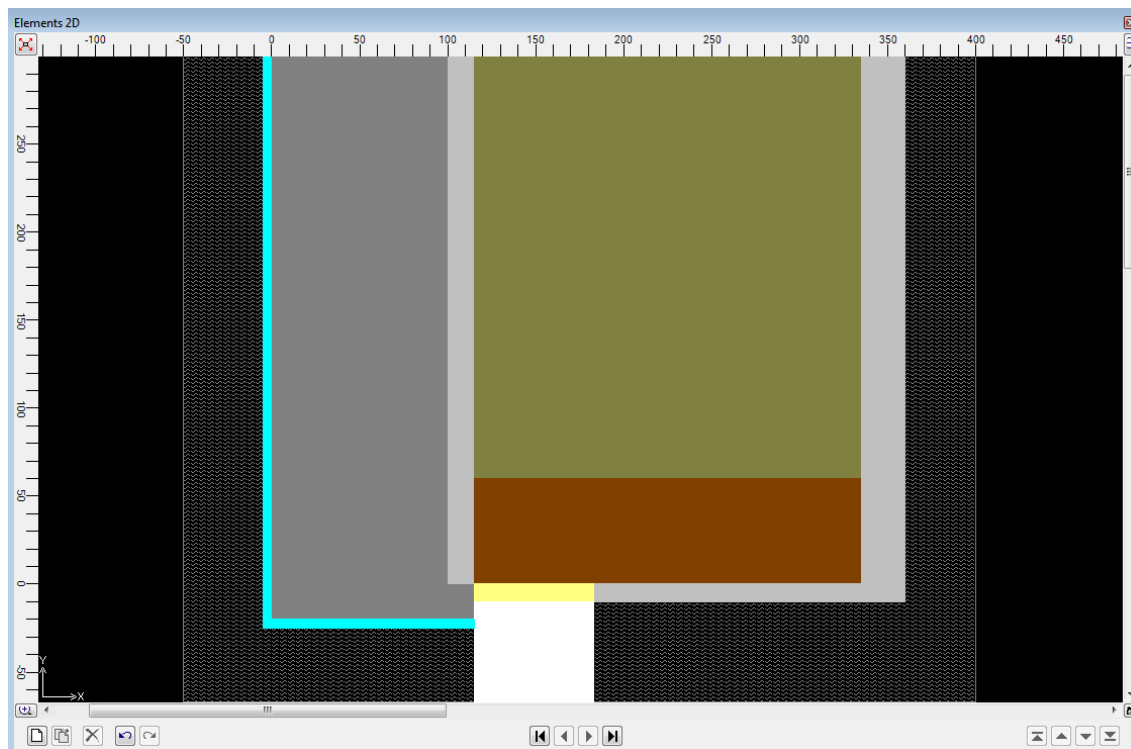
AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 24: Prikaz porazdelitve gostote toplotnega toka po konstrukciji

Toplota samodejno prehaja iz telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo. Večja kot je razlika v temperaturah, večji je toplotni tok. Iz zadnje slike takoj razberemo, da je gostota toplotnega toka povečana v okolici stika stene in okenskega okvirja. Predvsem na detajlu pri zunanji steni se opazi povečanje specifičnega toplotnega toka, kar kaže na nastanek toplotnega mostu na tem delu konstrukcije. Toplotni most nastane zaradi razlike med toplotno upornostjo konstrukcije v primerjavi z upornostjo okvirja. Linijski toplotni most se torej pojavi na vsej dolžini stika okvirja in konstrukcije, kar razberemo tudi iz barvne palete gostote toplotnega toka.

Stik zgoraj:

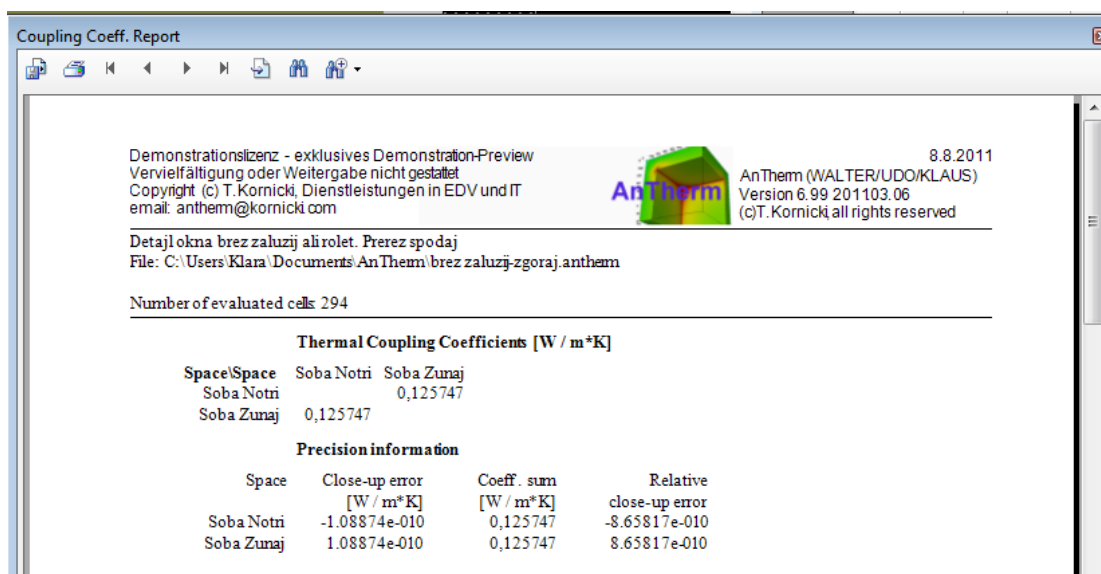
Na enak način, kot je opisano prej, zmodeliramo stik stene in okvirja na zgornjem delu. Toplotne prevodnosti materialov ostanejo enake (tabela 2), prav tako tudi skupna toplotna prehodnost stene.



Slika 25: Grafični prikaz zgornjega stika stene z okenskim okvirjem

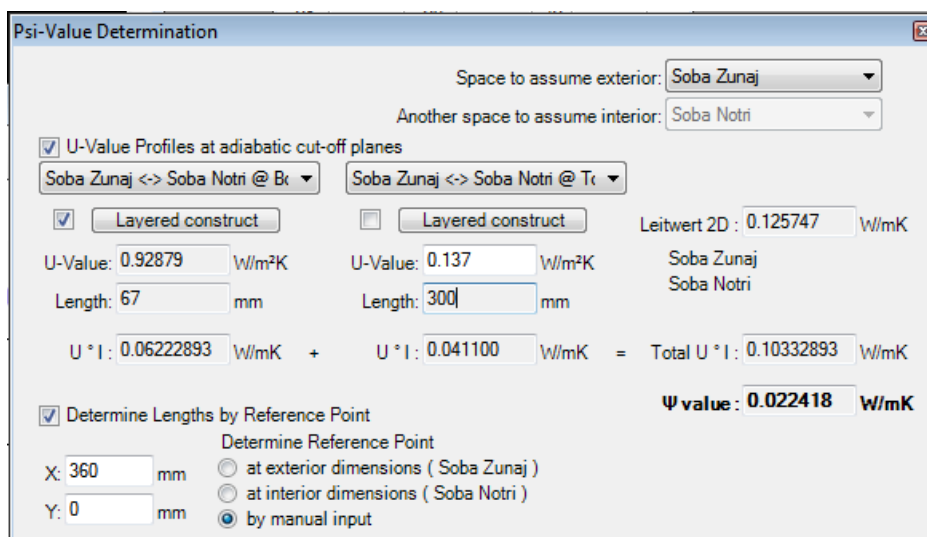
Po tem, ko je model izdelan, izvedemo še izračun. Prvi podatek je simetrična matrika koeficienta toplotne sklopitve (slika 24). Le-ta v našem primeru znaša

$$L_{2D} = 0,125747 \frac{W}{mK}.$$



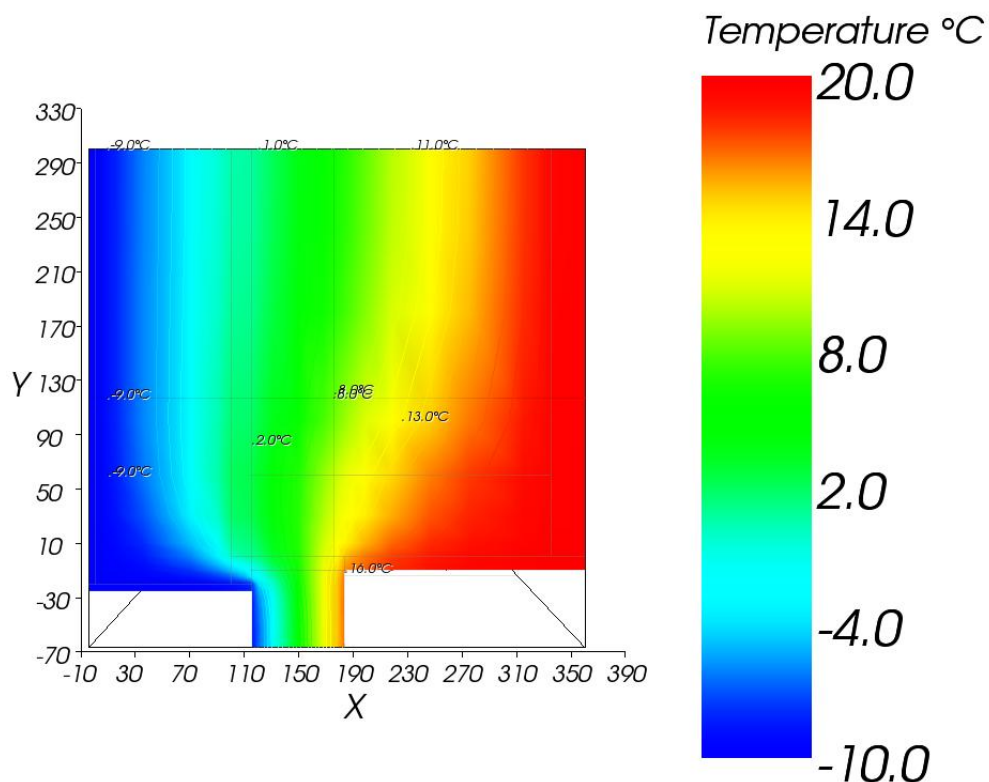
Slika 26: Prikaz simetrične matrike koeficientov toplotne sklopitve na stiku zgoraj

Velikost toplotnega mostu je tukaj nekoliko manjša zaradi povečanja toplotne izolacije na zunanji strani stika okvirja in stene. S tem smo preprečili izgube na problematičnem delu. Tudi tukaj smo morali ročno vnesti realno vrednost toplotne prehodnosti konstrukcije. Koeficient toplotnih izgub, ki nastanejo zaradi linearnega toplotnega mostu, se tako zmanjša na  $\psi = 0,0224 \frac{W}{m K}$ .



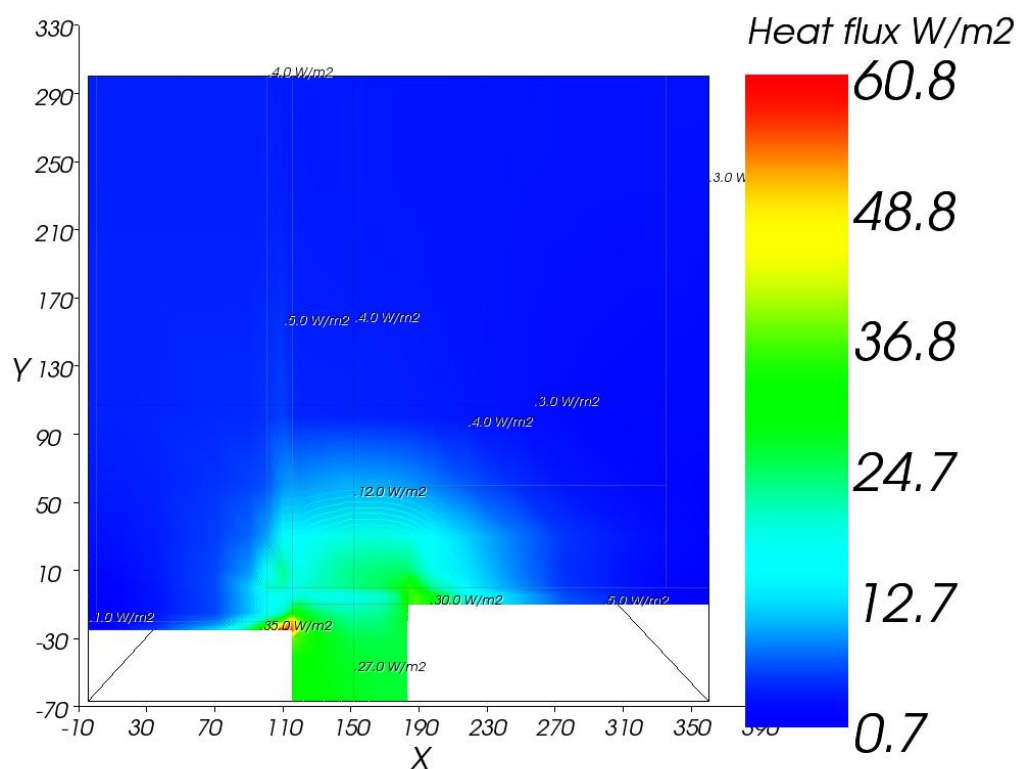
Slika 27: Velikost toplotnega mostu na stiku zgoraj

Zgolj zaradi majhnega prekrivanja s toplotno izolacijo, se vrednost toplotnega mostu zmanjša za več kot polovico. Takoj za tem izvedemo analizo s pomočjo podajanja robnih temperatur, s čimer dobimo vizualne rezultate. Ponovno postavimo isti temperaturi, 20 °C v notranji sobi in -10°C v zunanji.



AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 28: Porazdelitev površinske temperature na stiku zgoraj



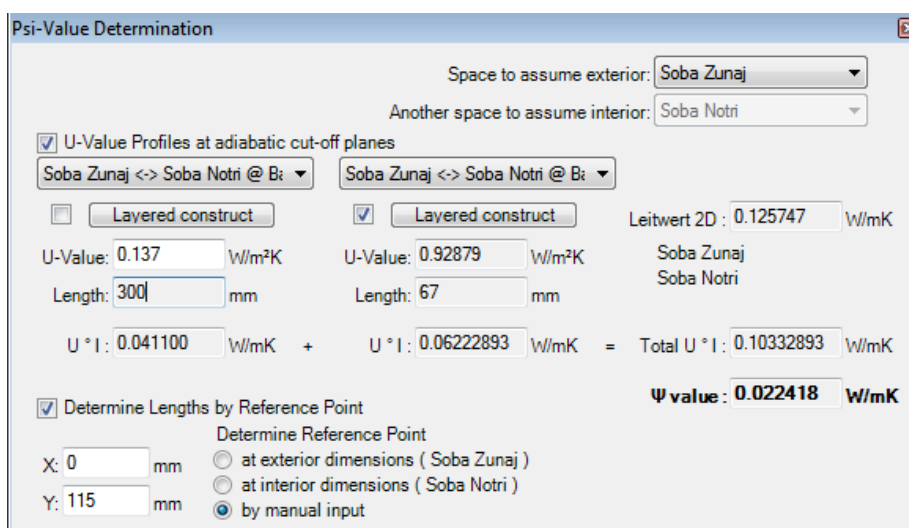
AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 29: Velikost gostote toplotnega toka na stiku zgoraj

Na sliki, ki prikazuje porazdelitev temperature (sl. 26), opazimo, da temperatura na notranji strani začenja zelo hitro padati. Na točki tik ob robu stika okna in stene je temperatura  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kar kaže na dobro izdelan stik. Z dovolj visokimi temperaturami na notranji strani se izognemo bojazni za nastanek kondenzacije vodne pare ali plesni.

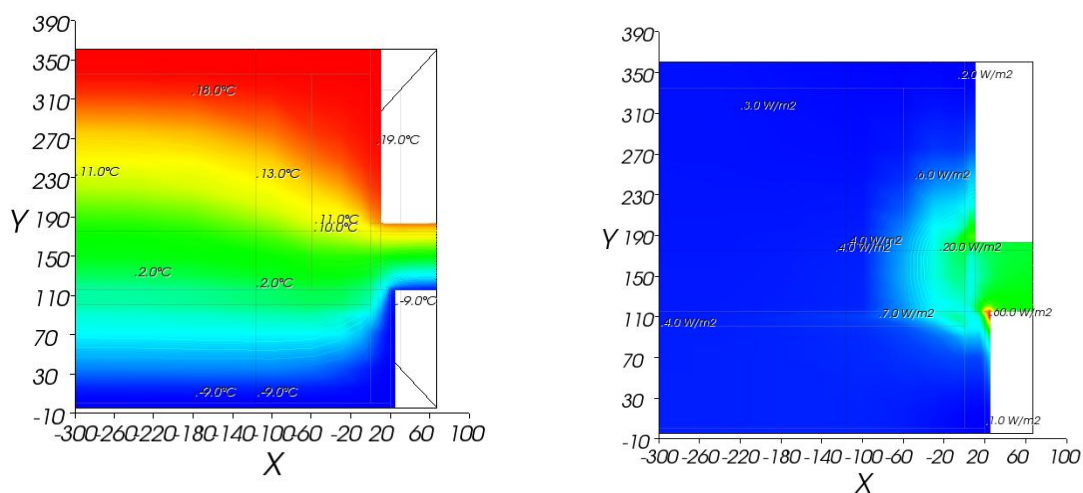
Tudi v tem primeru opazimo največjo gostoto toplotnega toka na stiku okvirja in stene. Le ta je, kot smo že zgoraj opisali, odvisena od gradienta temperature (Fourjerjev zakon), in očitno je v tem primeru gradient največji na zunanji strani stene. Linijski toplotni most se ponovno pojavi na istem mestu, in sicer tik pod okenskim okvirjem.





Slika 31: Velikost toplotnega mostu v primeru stranskega stika

Kot vidimo na sliki 28, se vse številke ujemajo. Potrebno je spremeniti zgolj koordinate X in Y referenčne točke. Glede na te rezultate je logično, da bodo tudi prikazi porazdelitve temperature po konstrukciji in gostote toplotnega toka popolnoma identični.



Slika 32: Porazdelitev površinske temperature in gostote toplotnega toka na stranskem stiku



### 5.5. Drugi primer – detajl stene in okna s skritimi žaluzijami

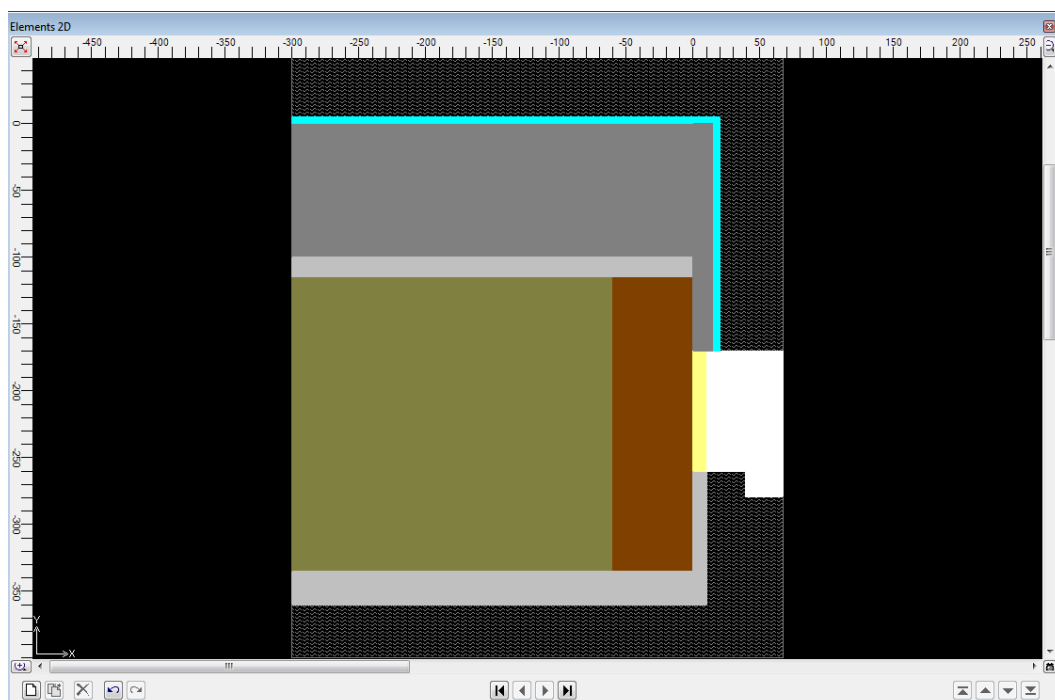
Kot že zgoraj omenjeno, se veliko ljudi odloča za skrito škatlo za žaluzije ali rolete. Takoj, ko pričnemo z uporabo žaluzij ali rolet, smo omejeni na pozicijo okna, saj moramo pustiti na zunanji polici dovolj prostora za rolete ali žaluzije in istočasno ohranjati razdaljo med oknom in žaluzijami ali roletami.

Spodnji prerez

Spodnji prerez v primeru vgrajenih podometnih žaluzij je enak kot v primeru brez žaluzij. Noben nov detajl se pri tem ne pojavlja, prav tako pa je tudi pozicija okna enaka. Rezultati so torej popolnoma enaki, kot so na slikah 15–21.

Stranski prerez

Razlika se pojavi že pri stranskem prerezu. Spremeni se pozicija in debelina okenskega okvirja ter se doda nekaj fasadne toplotne izolacije na zunanji strani okvirja. Ker uporabimo enak sistem stene, se tudi karakteristike materialov ne spreminjajo. Ostanejo iste kot v tabeli 2.



Slika 33: Grafični prikaz stranskega prereza z žaluzijami

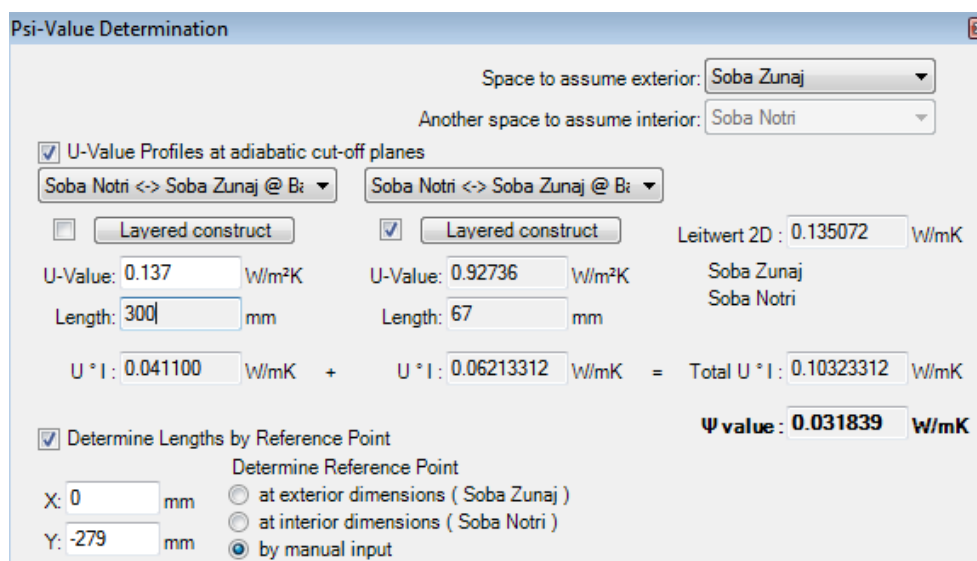
Kot vidimo, je okno za kar nekaj centimetrov pomaknjeno bolj v notranjost. To je nujno potrebno za to, da imamo prostor za žaluzije. V tem detajlu je vključene tudi nekaj dodatne izolacije na rob okvirja, s čimer se izboljša izpostavljenost toplotnega mostu.

Nato zaženemo izračun toplotnega mostu z enakimi robnimi pogoji, kot smo jih zgoraj že omenili, in sicer za zunanjo sobo določimo koeficient toplotne prestopnosti  $\alpha = 25 \frac{W}{m^2K}$ , za notranjo sobo pa  $\alpha = 7.692 \frac{W}{m^2K}$ . S tem določimo, kako se temperatura zniža tik ob zunanji in notranji steni.

Rezultati, ki jih dobimo so naslednji:

$$L_{2D} = 0,13507 \frac{W}{mK},$$

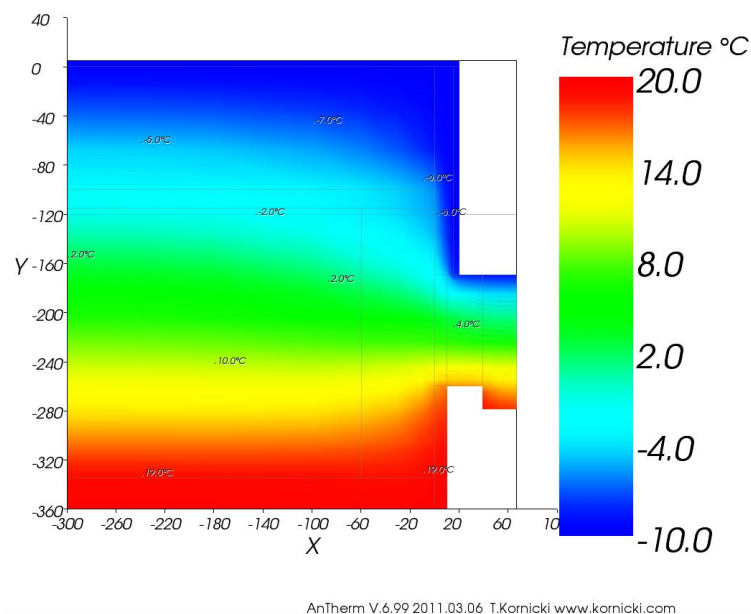
$$\psi = 0,031839 \frac{W}{mK}.$$



Slika 34: Izračun linearnega toplotnega mostu za stranski stik z žaluzijami

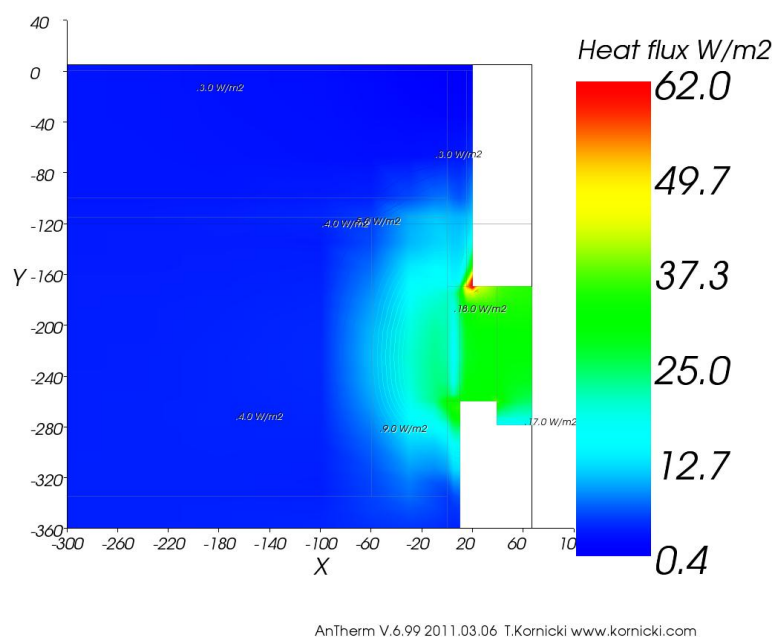
Zaradi dodane izolacije se vrednost koeficienta toplotne sklopitve občutno zmanjša, kar posledično zmanjša tudi velikost toplotnega mostu.

Vstavimo robne pogoje temperature.



Slika 35: Površinska temperatura stranskega prereza z žaluzijami

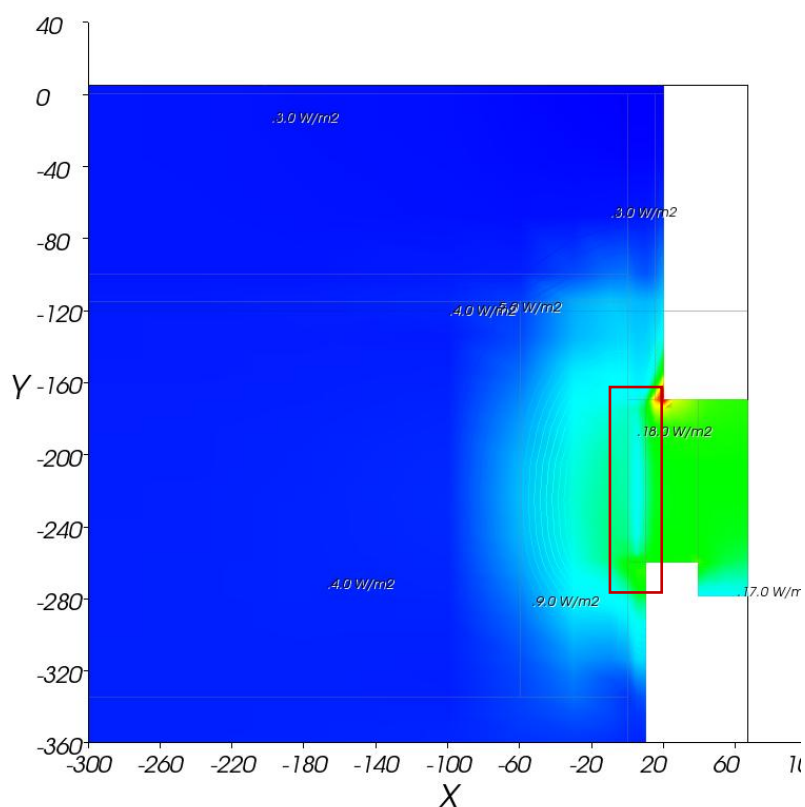
Zaradi večje površine okna opazimo, da se temperatura na robu ne spusti tako hitro kot v prejšnjih primerih. Minimalna temperatura na notranji strani znaša 15,56 °C. To je zelo dober znak, saj nizke temperature na stiku hitro vodijo do pojav vlage ali kondenza.



Slika 36: Prikaz porazdelitve gostote toplotnega toka po prerezu konstrukcije

Največja gostota toplotnega toka se ponovno pojavi na skrajnem oglišču med okvirjem in steno.

Pojavi se zanimiva svetla lisa na področju purpene, ki je prej nismo opazili (sl. 37). Zaradi večje površine okenskega okvirja je vrednost toplotne prevodnosti okvirja večja, kot je bila v prejšnjem primeru.  $U = 1,1 \frac{W}{m^2K}$ , ker pa v program ne moremo vnesti vrednosti za toplotno prehodnost, moramo vnesti vrednost lambda  $\lambda = U \cdot d$ . Torej, pri konstantni toplotni prehodnosti se toplotna prevodnost spreminja z debelino. V našem primeru je razlika med toplotno prevodnostjo okvirja in purpene bistveno večja kot v prejšnjem, ko je bilo okno ožje. Zaradi tega se pojavi svetla lisa na področju purpene, ki kaže, da se tam vrednost gostote toplotnega toka nekoliko zmanjša zaradi boljše toplotne prevodnosti materiala.

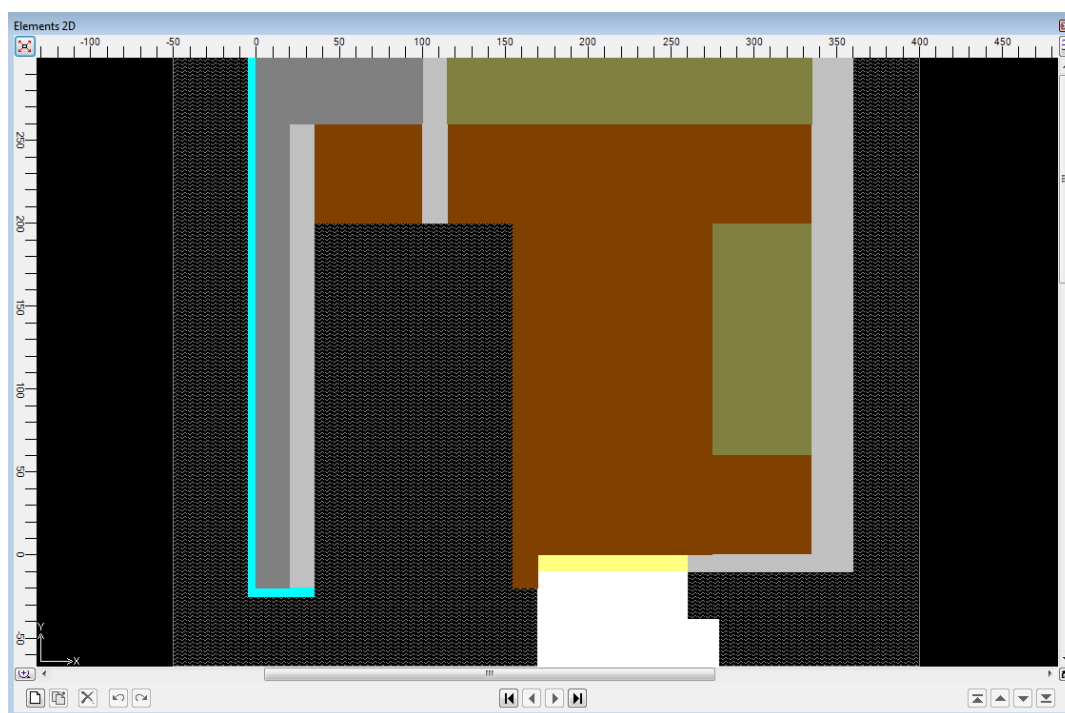


Slika 37: Prikaz spremembe toplotnega fluksa zaradi spremembe toplotne prevodnosti

### Zgornji stik

Podometne žaluzije, ki se pojavijo v takem primeru, so zelo priljubljene, saj skrijejo škatlo, ki drugače visi na fasadi. Vgradijo se lahko kot novogradnja ali kot adaptacija na objektu. Čeprav je iz estetskega vidika skrita žaluzija prednost, pa imajo podometne žaluzije toplotne prevodnosti zagotovo slabšo. Takoj vidimo, da je možnih več prebojev hladnega zraka skozi konstrukcijo zaradi pomanjkanja toplotne izolacije na stikih.

Tukaj je popolnoma drugačen detajl, kot smo ga izdelali prej. Pojavi se zračna odprtina, v kateri je predvidena škatla za skrite (podometne) žaluzije. Karakteristike vseh uporabljenih materialov ostanejo enake, kot so v tabeli 2.

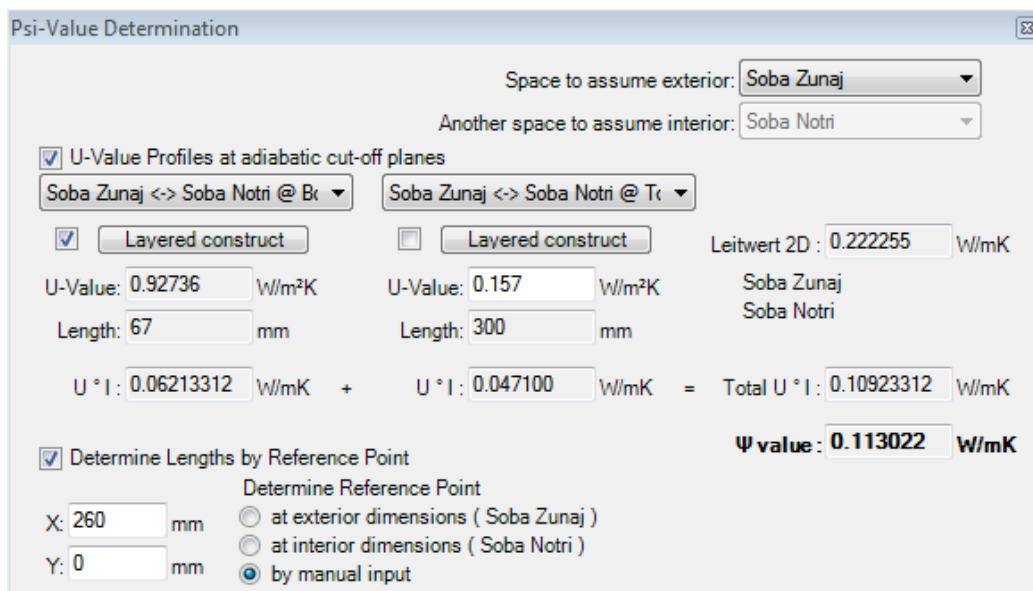


Slika 38: Grafični prikaz zgornjega detajla s skritimi žaluzijami

Po tem, ko program opravi izračun, dobimo rezultate koeficienta toplotne sklopitve in velikosti toplotnega mostu. Rezultati potrjujejo zgornjo napoved, da je tak detajl slab. V tem primeru moramo ponovno izračunati toplotno prehodnost stene, saj se je geometrija konstrukcije spremenila. Izračun izdelamo s pomočjo enačb 3.2–3.6. Toplotna prehodnost stene se tako poveča na  $U = 0,157 \frac{W}{m^2K}$ .

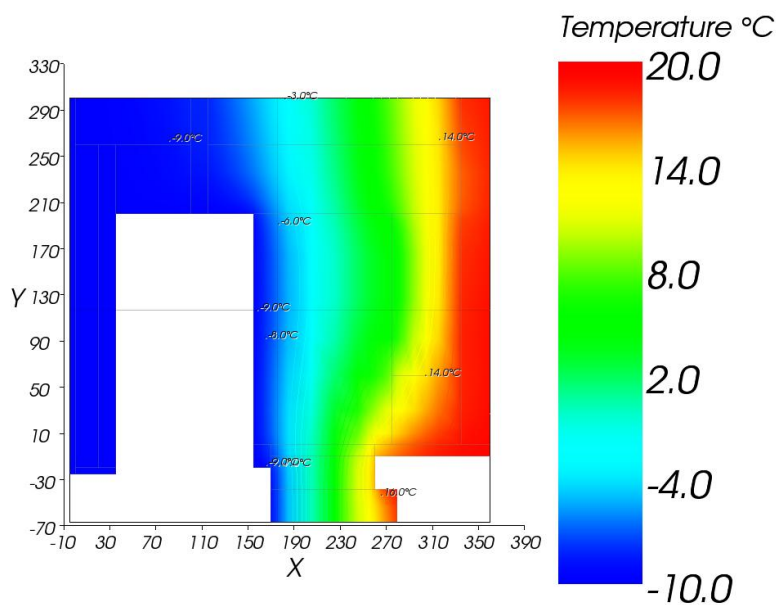
$$L_{2D} = 0,222255 \frac{W}{mK}$$

$$\psi = 0,113022 \frac{W}{mK}$$



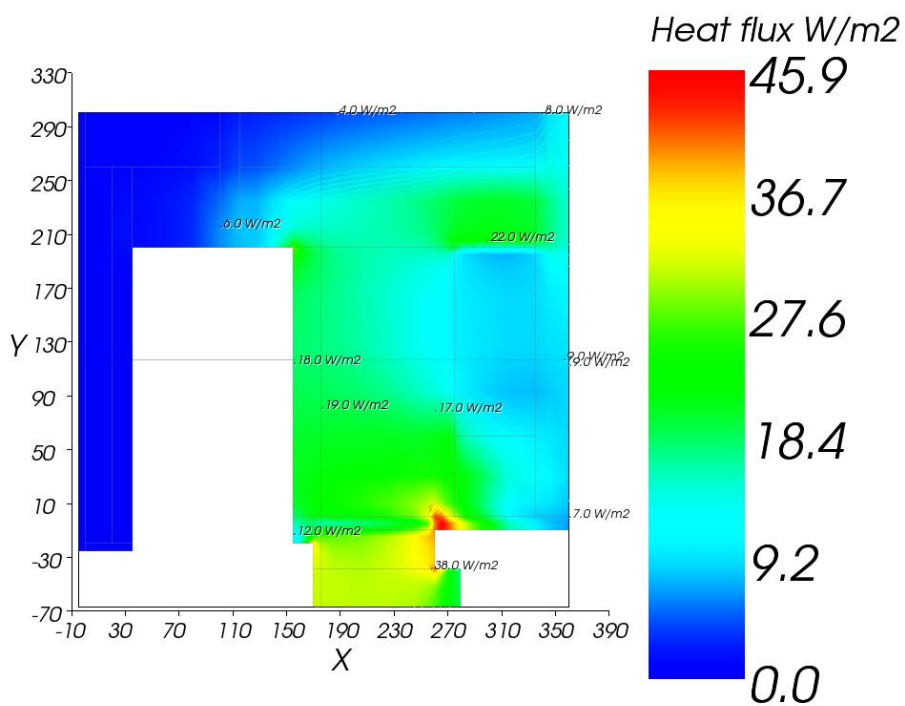
Slika 39: Okno za izračun toplotnega mostu

Sedaj lahko vstavimo robne pogoje temperature. Normalno je, da bodo v tem primeru temperature na notranji strani stika nekoliko manjše, kot so bile v stiku brez žaluzij, saj je toplotna prevodnost stene slabša. Vidimo tudi, da del pred odprtino za žaluzije v takšnem detajlu ne služi ničemu, saj je popolnoma izpostavljen zunanjemu zraku.



AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 40: Prikaz porazdelitve površinskih temperatur na stiku s skritimi žaluzijami

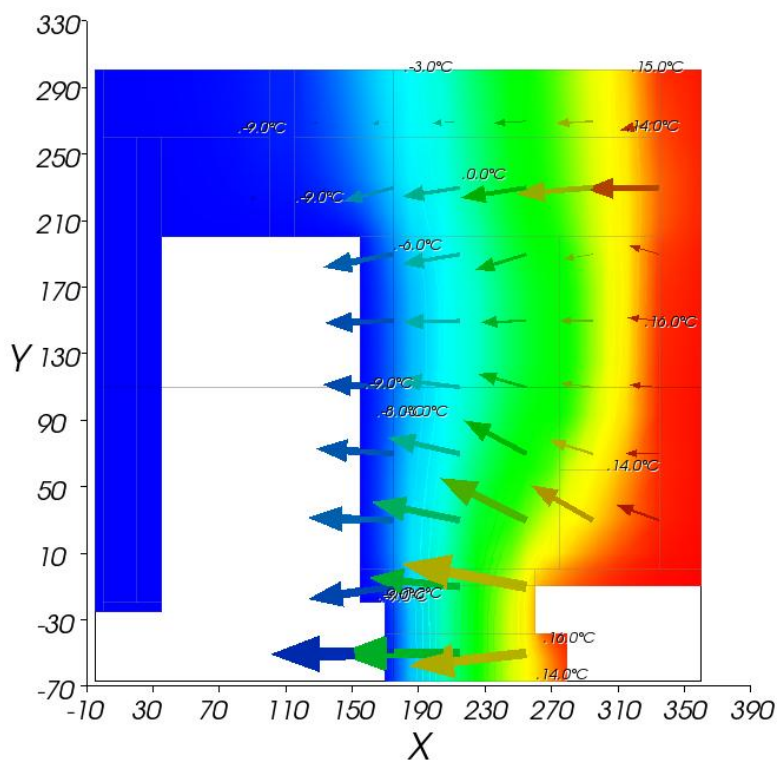


AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 41: Gostota toplotnega toka skozi prerez konstrukcije

Vidimo, da se gostota toplotnega toka tukaj obnaša drugače kot v prejšnjih primerih. Prvi razlog za to je drugačen sistem konstrukcije. Najmanjša gostota (izvzamemo levi del, saj se temperatura tistega dela sploh ne spreminja) se pojavi samo na delu toplotne izolacije na desni strani. Tukaj je toplotna prevodnost izjemno majhna v primerjavi z vsem ostalim delom. Ostali del predstavlja les, torej konstantna toplotna prevodnost, vendar se spreminja gradient temperature, kar vodi v povečanje toplotnega gostote toplotnega toka. Najbolj problematični del je okenski okvir, ki ima konstantno, vendar visoko gostoto toplotnega toka.

Program omogoča tudi vizualizacijo smeri toplotnega toka. Puščice kažejo, v katero smer uhaja toplota iz notranjega prostora. Večja kot je puščica, večji je toplotni tok na tistem delu. Že samo hiter pogled na sliko 42 nam pove, da se največ toplote porazgubi skozi okvir, najmanj pa na desnem delu, kjer je toplotna izolacija.



Slika 42: Prikaz smeri in velikosti toplotnega toka



## 6. REZULTATI

### 6.1. Primer brez žaluzij

Z analizo in dobljenimi številčnimi vrednostmi smo pokazali, da so stiki okenskega okvirja in stene izdelani dobro, vendar ne dovolj, da bi lahko upoštevali, da se toplotni most sploh ne pojavi ( $\psi \leq 0,01 \frac{W}{mK}$ ). To je normalno, saj izračun ni bil narejen za konstrukcijo, ki bi ustrezala normativom pasivne gradnje ( $U \leq 0,1 \frac{W}{m^2K}$ ), prav tako pa smo tudi za izbran okvir vzeli klasično toplotno prehodnost ( $U = 1,1 \frac{W}{m^2K}$ ).

Zanimivo je, kako se spreminja velikost toplotnega mostu in gostote toplotnega toka v primeru, ko prestavimo okenski okvir nekoliko navzven.

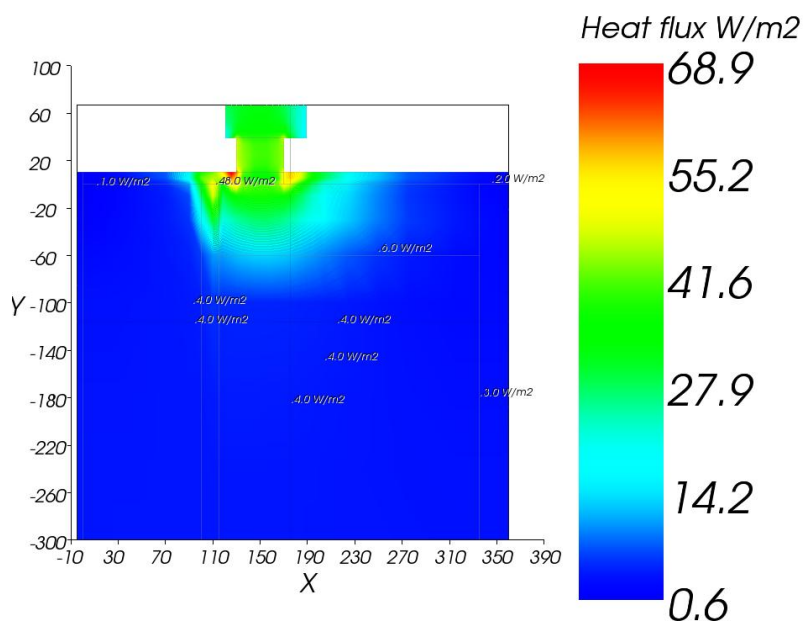
V zgornjem izračunu je okvir pomaknjen 130 mm navznoter. Naš namen je bil ugotoviti, ali se situacija izboljša, če okvir premaknemo naven.

Rezultati so bili sledeči.

Osnovni primer:

$$L_{2D} = 0,175606 \frac{W}{mK},$$

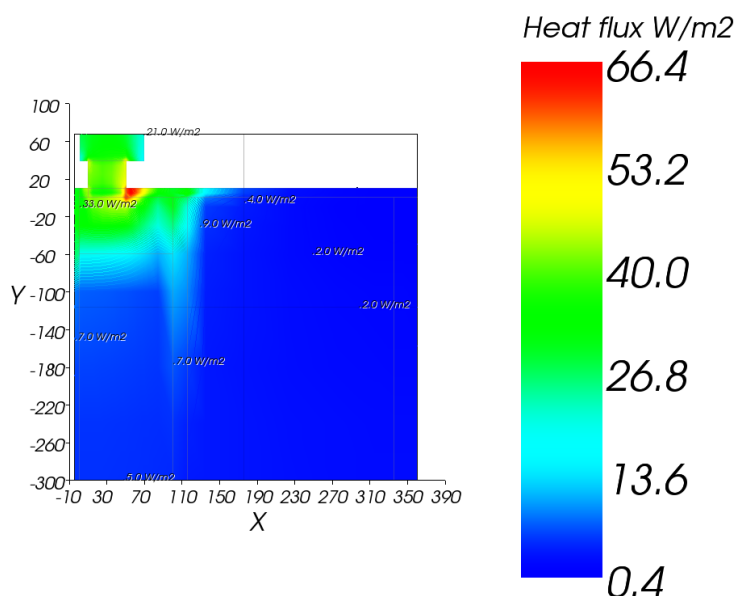
$$\psi = 0,072277 \frac{W}{mK}.$$



Okno pomaknemo čisto levo, zgolj 10 mm od roba:

$$L_{2D} = 0,202103 \frac{W}{mK},$$

$$\psi = 0,098774 \frac{W}{mK}.$$



AnTherm V.6.99 2011.03.06 T.Kornicki www.kornicki.com

Slika 44: Gostota toplotnega toka – okvir pomaknjen na zunanji rob

Vidimo, da se poveča koeficient toplotne sklopitve in posledično tudi velikost toplotnega mostu. To se zgodi zaradi slabše toplotne izolacije na zunanjem delu konstrukcije, ki predstavlja v tem primeru kritični predel. Prav tako smo morali postaviti v ta del leseno letev dimenzij 100x60 mm, saj je potrebno okno z vijaki pritrditi, kar pa ni mogoče, če je spodaj zgolj toplotna izolacija. Takoj opazimo, da takšna montaža ni najboljša, saj se toplotni tok skozi konstrukcijo poveča, kar povzroča na notranjem delu velik udar hladnega zraka.

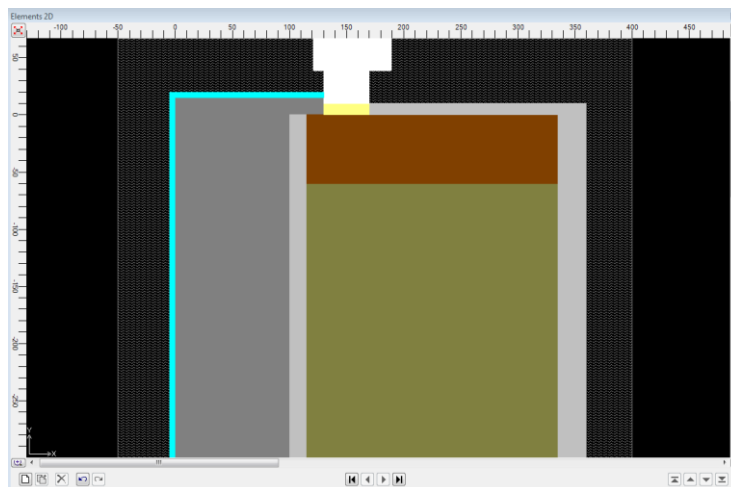
Ta primer smo izdelali, ker pri masivni gradnji večkrat predlagajo vgradnjo oken na skrajni zunanji rob konstrukcije. V tem primeru se potegne toplotna izolacija vse do okenskega okvirja in celo nekaj čez, s čimer se toplotni most bistveno zmanjša.

Pri lahki gradnji ni tako, saj se največ toplotne izolacije skriva v sami konstrukciji, zunaj pa se pojavi še dodatna fasadna izolacija. Res pa je, da bi bil detajl izveden bistveno boljše, če bi le nekaj milimetrov fasadne izolacije potegnili do okvirja in ga malo prekrili.

Detajl bi bil v primeru, da bi okvir prekrili zgolj za 5 mm, videti takole.

$$L_{2D} = 0,157195 \frac{W}{mK}$$

$$\psi = 0,053860 \frac{W}{mK}$$



Slika 45: Detajl v primeru, da povečamo toplotno izolacijo na zunanjem robu

Velikost toplotnega mostu se zmanjša za 40 %, kar je izjemno pri zgolj 1,5 cm dodane fasadne izolacije.

Program omogoča tudi kontrolo za nastanke plesni in kondenza. Nastanek plesni bi v tem primeru preverili z naslednjimi robnimi pogoji: zunanja temperatura  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  in 80 % vlažnost ter notranja temperatura  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  in 50 % vlažnost. Minimalna temperatura v tem primeru ne bi smela biti pod  $12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ko vstavimo takšne robne pogoje, je minimalna temperatura  $T_{min} = 14,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pri kontroli za nastanek kondenza moramo zunanjo temperaturo znižati na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter dobiti minimalno notranjo temperaturo nad  $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V tem primeru temperatura ne sme pasti pod  $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tudi temu pogoju zadostimo, saj je minimalna temperatura  $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kot vidimo na sliki 21.

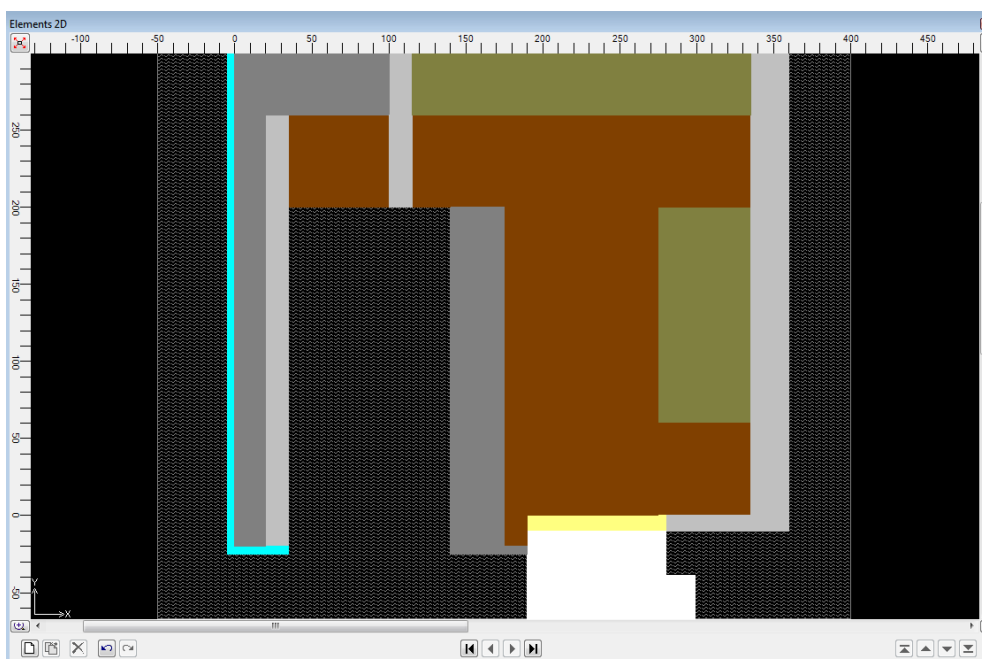
Opisan in izračunan primer predstavlja osnovni model stika okvirja in stene. Pri tem opazimo, da bi dosegli boljše rezultate, če bi nekaj fasadne toplotne izolacije potegnili do okvirja. S tem bi se toplotna upornost stene nekoliko povečala, bistveno pa bi se zmanjšal toplotni tok na problematičnem delu stene. Zavedati pa se je potrebo, da so ti rezultati za večino sedaj obstoječih hiš že presežek. Kljub temu da ne dosegajo standarda pasivnih hiš, je ta velikost linearnega toplotnega mostu majhna in zagotavlja ugodne bivalne pogoje.

## 6.2. Primer s skritimi žaluzijami

V tem primeru stranski in spodnji stik ne predstavljata problematičnih delov. Spodnji del je izdelan na enak način kot v prvem primeru, zato bi bila primerna tudi enaka izboljšava (nekaj mm izolacije do okvirja).

Problem te vgradnje okvirja in žaluzij je detajl zgoraj. Že sam rezultat toplotnega mostu nam jasno kaže, da ta del ni izveden korektno.

Primer nekoliko boljše izdelanega detajla, vendar ne nujno korektnega, je na sliki 46.



Slika 46: Izboljšava stene s skritimi žaluzijami

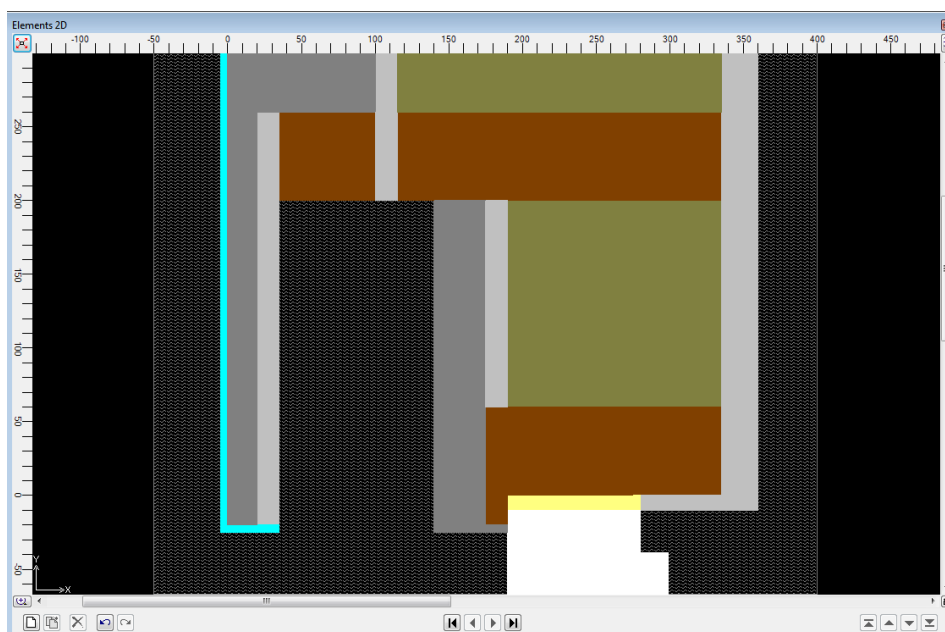
Okno smo v tem primeru pomaknili nekoliko navznoter, zmanjšali del lesa in dodali nekaj fasadne toplotne izolacije. V pomikanju okna navznoter in dodajanju fasadne izolacije smo zelo omejeni, saj odklik žaluzije od okna ne sme bit prevelik.

V tem primeru so rezultati že boljši.

$$L_{2D} = 0,18334 \frac{W}{mK}$$

$$\psi = 0,079551 \frac{W}{mK}$$

Še dodatno se prerez izboljša z dodajanjem izolacije v predel lesene letve. S tem izboljšamo toplotno prevodnost stene in dodatno zaščitimo okvir z nekaj mm fasadne izolacije. Ponovno smo omejeni z debelino zaradi odmika žaluzij in okna.



Slika 47: Izboljšan prerez s skritimi žaluzijami

Rezultati so logična posledica dodajanja izolacije, saj se toplotni most že bistveno zniža.

$$L_{2D} = 0,169575 \frac{W}{mK}$$

$$\psi = 0,066342 \frac{W}{mK}$$

Kljub temu da rezultati kažejo na izjemno slab detajl, v resnici ni tako. V del, v katerem se prikazuje, kot da je zgolj mrzel zrak, se postavi škatla z žaluzijami ali roletami, ki je že sama po sebi dobro izolirana. Na tak način se hitro zmanjša vdor hladnega zraka v konstrukcijo.

Omeniti je potrebno, da zgoraj podani rešitvi nista nujno korektni z vidika statičnega izračuna.

## 7. SKLEP

V diplomski nalogi smo obravnavali vgradnjo oken v montažne stene, in sicer dva primera vgradnje v enak sistem stene. Prvi način je okno brez posebnega detajla za vgradnjo žaluzij ali rolet. V takšnem primeru se škatla lahko naknadno montira na zunanjo stran stene, kar imenujemo nadokenske rolete ali žaluzije.

Drug primer je vgradnja skritih žaluzij, za katero se odloča vedno več ljudi. V tem primeru skrijemo škatlo pod omet in nekaj izolacije.

Ker sta oba sistema vezana na isto konstrukcijo stene, je primerjava med njima enostavna. Pri stiku spodaj se ne pojavijo bistvene razlike v rezultatih. V primeru brez žaluzij imamo možnost premikanja okvirja nekoliko navzven ali noter. Pretirani premiki niso dobri, kot smo dokazali v primeru, ko smo okno postavili čisto na zunanji rob in so se pojavili za kar nekaj procentov slabši rezultati od osnovnih. Ko pa obravnavamo okno z žaluzijami, nam niso dopuščeni preveliki premiki, saj smo omejeni na velikost zunanje police, ki zadošča žaluzijam.

Pojavijo se rahle spremembe pri stikih na straneh. Različne rezultate dobimo zaradi postavitve okvirja na različne pozicije. Detajl z žaluzijami ima okvir postavljen nekoliko bolj navznoter in se zaradi tega toplotni most poveča, vendar so te spremembe zelo majhne.

Velike spremembe se pojavijo pri stiku zgoraj. Detajla sta v tem primeru popolnoma različna. Že samo, ko pogledamo načrt, vidimo, da ima tisti s skritimi žaluzijami manj toplotne izolacije kot tisti brez žaluzij. Iz tega sklepamo, da bo tudi rezultat slednjega boljši. Domneve se takoj potrdijo. Prvi primer (brez žaluzij) da dobre rezultate, običajno

tudi boljše, kot so na spodnjem stiku, saj je nekaj toplotne izolacije povlečene do roba okvirja. S tem se pokrije velik dela stika, kjer se pojavlja toplotni most. Že takoj se zmanjša velikost koeficienta toplotne sklopitve, posledično pa tudi vrednost linijskega toplotnega mostu.

V drugem primeru je stik izdelan slabše, saj je veliko premalo toplotne izolacije za doseganje dobrih rezultatov. Preboji za vdor hladnega zraka se pojavljajo na vseh robovih, kjer so leseni deli. Dejstvo je, da je les že sam po sebi dober izolator in zaradi tega se pomanjkanje izolacije ne pozna tako močno, da bi prišlo do vlage ali kondenza. Kot je prikazano v izboljšavah tega primera, z nekaj truda hitro dosežemo boljše rezultate.

Potrebno je povedati, da člen iz obstoječega standarda SIST EN ISO 14683 pravi:

»Če imajo vsi toplotni mostovi v stavbi linijsko toplotno prehodnost  $\Psi(i) \leq 0,2 \text{ W/mK}$  ali  $\Psi(e) \leq 0,1 \text{ W/mK}$  (standard SIST EN ISO 14683), se lahko njihov vpliv upošteva na poenostavljeni način s povečanjem toplotne prehodnosti celotnega ovoja stavbe za  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ .«

Pri čemer indeksa *i* in *e* pomenita *i* – interior (notranjost) in *e* – exterior (zunanost).

Naši izračuni so dokazali, da so vse vrednosti toplotnih mostov na stiku oken manjše od  $0,1 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ . Če bi želeli uporabiti pravilo, opisano zgoraj, bi morali preveriti še vse ostale stike, kjer bi se lahko pojavil linijski toplotni most.

## 8. VIRI IN LITERATURA

- [1] Lochner, Dietmar, in Ploss, Wolfgang, 1980: *Toplotna in zvočna izolacija v stanovanjih*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- [2] *URSA Slovenija, Katalog toplotnih in zvočnih izolacij*, [www.ursa.si](http://www.ursa.si). Pridobljeno 20. 4. 2011.
- [3] *Rockwool, protipožarna odpornost*,  
<http://www.rockwool.si/izdelki+in+uporaba/lastnosti+kamene+volne>. Pridobljeno 16. 5. 2011.
- [4] *Spletni portal za gradnjo*, <http://www.gradimo.com/gradnja/4378/o-no>. Pridobljeno 16. 5. 2011.
- [5] *ENSVET – energetska svetovanje*, <http://gcs.gi-zrmk.si>. Pridobljeno 22. 5. 2011.
- [6] *Strokovna revija za ogrevanje, vodovod, prezračenje in gradnjo – Instalater*, <http://www.instalater.si/>. Pridobljeno 26. 5. 2011.
- [7] *Portal za leseno gradnjo*,  
[http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/RAL\\_montaza.pdf](http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/RAL_montaza.pdf). Pridobljeno 15. 6. 2011.
- [8] *Portal o montažnih hišah*, <http://montazne-hise-on.net>. Pridobljeno 21. 6. 2011.
- [9] *Lumar IG d. o. o.*, <http://www.lumar.si>. Pridobljeno 20. 4. 2011.
- [10] Hilbig, Gerhard, 1999: *Grundlagen der Bauphysik*. Wien: Carl Hanser Verlag.
- [11] Hausmart, <http://www.hausmart.si/zaluzije-rolete/rolety/zunanje-rolete/>. Pridobljeno 9. 8. 2011.



[12] Zavod za gradbeništvo Slovenije,

[http://www.zag.si/dl/lablist/termografija\\_internet.pdf](http://www.zag.si/dl/lablist/termografija_internet.pdf). Pridobljeno 9. 8. 2011.

[14] *Program AnTherm*,

[http://www.antherm.eu/antherm/Help/Content\\_EN/Tutorials/index.htm](http://www.antherm.eu/antherm/Help/Content_EN/Tutorials/index.htm). Pridobljeno 20. 4. 2011.

[15] SIST EN ISO 10211: 2008: Toplotni mostovi in površinske temperature – Podrobni izračun.

[16] SIST EN ISO 13786: 2008: Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods.

[17] SIST EN ISO 14683: 2007: Thermal bridges in building construction – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values.

[18] Zupan, Matjaž, 2002: *Pravilnik o toplotni zaščiti in učinkoviti rabi energije v stavbah*. Novo mesto: Pfeleiderer Novoterm, d. o. o.

[19] SIST EN ISO 6946:2008: Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računska metoda (ISO 6946:2007).

## **9. PRILOGE**

### **9.1. Naslov študentke**

Klara Pucko

Gradiška 27 a

2211 Pesnica pri Mariboru

Tel.: 040 190 901

E-mail: [klarapucko@gmail.com](mailto:klarapucko@gmail.com)

### **9.2. Kratek življenjepis**

Rojena: 7. 1. 1987 v Mariboru

Šolanje: 1994–2002 Osnovna šola Bojana Iliča, Maribor

2002–2006 Druga gimnazija Maribor

2006–2011 Fakulteta za gradbeništvo, Maribor

### **9.3. Načrti detajlov**