

# Analiza potencijala energetske obnove zidane nestambene zgrade u Zagrebu

---

Šuštić, Anamarija

Master's thesis / Diplomski rad

2025

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:371155>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Anamarija Šuštić

# Analiza potencijala energetske obnove zidane nestambene zgrade u Zagrebu

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Anamarija Šuštić

# Analiza potencijala energetske obnove zidane nestambene zgrade u Zagrebu

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Anamarija Šuštić

**Analysis of the energy renovation potential  
of a brick non-residential building in Zagreb**

MASTER THESIS

Mentor: izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović

Zagreb, 2025.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Anamarija Šuštić, 0082061152

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Analiza potencijala energetske obnove zidane nestambene zgrade u Zagrebu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

19.2.2025.

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Anamarija Šuštić, 59930553974

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Analiza potencijala energetske obnove zidane nestambene zgrade u Zagrebu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv.prof. Bojan Milovanović

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

27.2.2025.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

19.2.2025.

Potpis:

## ZAHVALE

Prvo se želim zahvaliti svom mentoru na pomoći, stručnosti i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Svojim znanjem i iskustvom pomogao mi je da jasno oblikujem svoje ideje i provedem ih do zadanih ciljeva.

Posebno zahvaljujem što me je naučio vještini kritičkog razmišljanja i analitičkom pristupu problemima. Te će mi vještine, osim u ovom radu, pomoći u cijelom mom profesionalnom razvoju.

Ovaj diplomski rad posvećujem svojim roditeljima kao znak zahvale na svemu što su mi pružili. Bez njih sve ovo ne bi bilo moguće.

Hvala i svim mojim prijateljima i kolegama na podršci i na tome što su cijeli ovaj put učinili ljepšim i lakšim.



## SAŽETAK

Istražen je potencijal energetske obnove, kao sastavnog dijela sveobuhvatne obnove zgrade i to do razine zgrade nulte emisije. Utvrđene su mogućnosti i ograničenja energetske obnove predmetne zgrade i definiran je koncept energetske obnove usmjeren na vanjskoj ovojnici zgrade. Na temelju postojećih građevinskih podloga izrađen je BIM model zgrade pomoću računalnog paketa Archicad.

Predložene mjere analizirane su s nekoliko aspekata:

- i) energija potrebna za grijanje i hlađenje zgrade do razine zgrade gotovo nulte energije
- ii) utjecaj toplinskih mostova
- iii) dugoročno higrotermalno ponašanje
- iv) proračun emisije CO<sub>2</sub>eq plinova tijekom cjelokupnog životnog vijeka zgrade

Proračun energije koja je potrebna za grijanje, hlađenje i potrošnu toplu vodu proveden je pomoću satne metode proračuna, dok je proračun vrijednosti toplinskih mostova proveden korištenjem numeričkog modela. Pomoću računalnog programa WUFI 6 , koji je zasnovan na HAM modelima provedena je analiza difuzije vodene pare. Na kraju je proračunata emisija CO<sub>2</sub> plinova prema modelu „od kolijevke pa do groba“.

**Ključne riječi:** energetska obnova, nZEB, kulturna baština, toplinski mostovi, kondenzacija vodene pare, emisija CO<sub>2</sub>

## SUMMARY

The potential for energy renewal as part of a comprehensive building renovation has been investigated, aiming to achieve a nearly zero-emission building. The possibilities and limitations of the energy renovation of the building have been identified, and the energy renovation concept has been defined, focusing on the building's external envelope. Based on the existing architectural data, a BIM model of the building was created using the Archicad software package.

The proposed measures were analyzed from several aspects:

- i) required energy for heating and cooling the building to nearly zero energy standards
- ii) the impact of thermal bridges
- iii) long-term hygrothermal behavior
- iv) calculation of CO<sub>2</sub>eq emissions throughout the entire lifecycle of the building

The required energy for heating, cooling, and hot water was calculated using an hourly calculation method, while the calculation of thermal bridge values was performed using a numerical model. The WUFI 6 software, based on HAM models, was used to analyze water vapor diffusion. Finally, CO<sub>2</sub> emissions were calculated based on a "cradle-to-grave" model.

**Keywords:** energy renovation, nZEB, cultural heritage, thermal bridges, water vapor condensation, CO<sub>2</sub> emissions

---

## SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ.....	iv
1. UVOD.....	1
2. METODE I TEHNIKE RADA.....	2
3. ENERGETSKA OBNOVA.....	3
3.1. Energetska učinkovitost zgrada u Hrvatskoj.....	3
3.2. Direktiva (EU) 2024/1275.....	4
3.3. NZEB.....	4
3.3.1. Osnovni principi projektiranja NZEB projektiranja.....	5
3.3.1.1. Toplinska ovojnica kod NZEB projektiranja.....	6
3.3.1.2. Zrakonepropusnost vanjske ovojnice.....	7
3.3.1.3. Toplinski mostovi kod NZEB projektiranja.....	8
3.3.1.4. Toplinska masa zgrade.....	10
3.3.1.5. Prozori kod NZEB projektiranja.....	10
3.3.1.6. Ispitivanje zrakopropusnosti.....	13
3.3.1.7. Infracrvena termografija.....	14
3.4. Energetska obnova zgrada kulturne baštine.....	15
3.4.1. Postupak primjene mjera energetske učinkovitosti na graditeljskoj baštini.....	15
3.4.1.1. Pripremni dio postupka.....	16
3.4.1.2. Energetska obnova zgrada koje imaju status zaštićenog kulturnog dobra.....	16
3.4.1.3. Protokoli i procedure.....	16
3.4.1.4. Preporuke za izradu projekta energetske obnove zgrade.....	17
3.4.2. Mjere energetske obnove kulturne baštine.....	17
3.4.2.1. Povećanje toplinske zaštite zidova.....	17
3.4.2.2. Povećanje toplinske zaštite krovova.....	18
3.4.2.3. Povećanje toplinske zaštite međukatnih konstrukcija.....	18

---

3.4.2.4.	Vanjska stolarija.....	18
3.4.2.5.	Povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i obnovljivi izvori energije.....	19
3.5.	Utjecaj građevnih materijala na okoliš i emisiju CO <sub>2</sub> .....	21
3.5.1.	Procjena održivosti betona.....	21
3.5.2.	Održivost drva u graditeljstvu.....	24
3.5.3.	Održivost čelika u graditeljstvu.....	25
<b>4.</b>	<b>FIZIKA ZGRADE.....</b>	<b>26</b>
4.1.	Općenito o građevini.....	26
4.2.	Klimatski podaci.....	28
4.3.	Postojeće stanje građevine.....	28
4.4.	Građevni dijelovi.....	30
4.5.	Karakteristike otvora.....	34
4.6.	Toplinski gubici i dobici.....	35
4.7.	Podaci o termotehničkom sustavu i rasvjeti.....	37
4.8.	Rezultati uštede nakon obnove.....	41
<b>5.</b>	<b>PRORAČUN TOPLINSKIH MOSTOVA .....</b>	<b>42</b>
5.1.	Detalj D1 .....	44
5.1.1.	Detalj D1 – prvo rješenje.....	45
5.1.2.	Detalj D1 – drugo rješenje .....	49
5.2.	Detalj D2 .....	52
5.3.	Detalj D3 .....	56
5.3.1.	Detalj D3 – prvi slučaj .....	56
5.3.2.	Detalj D3 – drugi slučaj.....	60
5.4.	Detalj D4 .....	63
5.5.	Detalj D5 .....	67
<b>6.</b>	<b>Utjecaj vlage.....</b>	<b>71</b>
6.1.	Proračun difuzije vodene pare .....	72
6.1.1.	Rezultati proračuna zidova na granici grijano – vani .....	74
6.1.2.	Rezultati proračuna krova.....	79
6.1.3.	Kosi krov .....	83
6.1.3.1.	Presjek kroz mineralnu vunu.....	83
6.1.3.2.	Presjek kosog krova kroz rog.....	85
6.1.4.	Zid u podrumu na granici grijano-tlo.....	90

---

6.1.5.	Podrumski zid – prvi slučaj.....	90
6.1.6.	Podrumski zid – drugi slučaj .....	93
<b>7.</b>	<b>proračun emisije CO<sub>2</sub> plinova.....</b>	<b>97</b>
7.1.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za pod na tlu.....	98
7.2.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za vanjske zidove.....	101
7.3.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za kosi krov.....	103
7.4.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za ravni krov.....	105
7.5.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za unutarnje nosive zidove .....	108
7.6.	Rezultati proračuna za pregradne zidove .....	110
7.7.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za međukatnu konstrukciju.....	112
7.8.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za otvore .....	115
7.9.	Rezultati proračuna emisije CO <sub>2</sub> za termotehničke sustave.....	117
7.10.	Rekapitulacija rezultata .....	119
<b>8.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>122</b>
	<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>124</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>127</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>132</b>
	<b>PRILOG A .....</b>	<b>134</b>

## 1. UVOD

Energetska učinkovitost je korištenje manje količine energije za obavljanje iste količine posla, što podrazumijeva grijanje, hlađenje, proizvodnju potrošne tople vode i tako dalje. Velika potrošnja energije za sobom vuče i veće emisije CO<sub>2</sub> pa je zbog toga potrebno racionalno trošenje dostupnih energenata. Povećanjem toplinsko-izolacijskih karakteristika zgrade moguće je smanjenje ukupnih gubitaka topline za prosječno 30-60%. [1]

Europska unija obvezala se je smanjiti neto emisije stakleničkih plinova za 55% u gospodarstvu Europske unije do 2030. godine. Prema Direktivi (EU) 2024/1275 svaka država članica mora odrediti nacionalni plan s pomoću kojeg će obnoviti zgrade do statusa zgrada gotovo nulte energije do 2030. godine. [13]

Zgrade gotovo nulte energije potrebno je projektirati s ciljem smanjenja energetske potreba, uz koordinirani pristup svih struka. Energetski koncept mora biti uključen od početka, s usklađenim toplinskim izolacijama i termotehničkim sustavima s obnovljivim izvorima energije. Rješenja moraju biti ekonomski optimalna, ekološki prihvatljiva i održiva. Također, važna je dobra ventilacija s rekuperacijom topline i održavanje unutarnje temperature da bi se spriječile štete od kondenzacije. Osnovni principi projektiranja su neprekinuta toplinska izolacija, ugradnja otvora s povoljnim toplinskim svojstvima, ugradnja mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline, osiguranje nepropusnosti vanjske ovojnice i minimiziranje toplinskih mostova. [7]

Povećanje energetske učinkovitosti povijesnih zgrada uključuje nekoliko ključnih mjera koje čuvaju kulturne vrijednosti. Čest je slučaj da oblaganje vanjskih zidova nije prihvatljivo, pa se preporučuje unutarnja izolacija ili upotreba suvremenih izolacijskih materijala koji podržavaju očuvanje povijesnih vrijednosti. Kada je riječ o sustavima grijanja, hlađenja i ventilacije, potrebno je prilagoditi tehničke sustave zgradi tako da se očuva kulturna baština. [10]

Razvoj građevinske industrije u posljednja dva desetljeća povećao je potrošnju energije i emisiju stakleničkih plinova. Građevinarstvo, zbog velikog trošenja betona, troši velike količine prirodnih resursa i proizvodi veliku količinu otpada. Cement je glavni izvor emisije CO<sub>2</sub>, koja čini oko 7% globalnih emisija. S ciljem smanjenja utjecaja na okoliš, važno je odabrati materijale s minimalnim utjecajem tijekom cijelog životnog ciklusa, od proizvodnje do odlaganja, uz pažljivo praćenje potrošnje energije, transporta, emisija i otpada. [16]

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

Tema ovog diplomskog rada je istražiti potencijal nestambene zidane zgrade u Zagrebu. Budući da je zgrada dio kulturno povijesne cjeline, javljaju se određena ograničenja zbog konzervatorskih smjernica. U ovom su poglavlju opisane metode i tehnike kojima je istražen potencijal energetske obnove.

U prvom je dijelu rada opisana teorijska podloga na temu energetske učinkovitosti, preporukama za obnovu kulturne baštine, o zgradama gotovo nulte energije i o utjecaju građevinskih proizvoda na emisiju CO<sub>2</sub>.

U prvoj je fazi na temelju dostupnih nacрта i fotografija izrađen 3D model zgrade u računalnom programu Archicad. Pomoću njega dobivene su geometrijske karakteristike potrebne za daljnji proračun. Navedene su geometrijske karakteristike poslužile kao ulazni podaci za računalni program „KI Expert Plus“ pomoću kojeg je proveden proračun fizike zgrade. Pomoću njega dobiven je proračun termotehničkih sustava i obnovljivih izvora energije te energetska certifikat. Sljedeći je korak proračunavanje toplinskih mostova u računalnom programu „CRORAL“. Odabrano je pet linijskih toplinskih mostova koji su detaljno razrađeni. Provjera opasnosti od kondenzacije vodene pare provedena je u programskom paketu WUFI Light 6.3.2. Posljednji je korak u ovom radu proračun emisije CO<sub>2</sub>eq.



Slika 1 Shematski prikaz provedenog istraživanja

### 3. ENERGETSKA OBNOVA

Energetska učinkovitost predstavlja sumu provedenih mjera kojima je cilj maksimalno smanjenje korištenja energije na način da razina udobnosti u prostoru ostane ista. Odnosno, energetska učinkovitost je korištenje manje količine energije za obavljanje iste količine posla kao što je grijanje, hlađenje i dr. Važno je razlikovati energetska štednja i energetska učinkovitost. Štednja predstavlja određena odricanja, a učinkovitija uporaba energije ni na koji način ne narušava uvjete života i rada u prostoru. [1]

#### 3.1. Energetska učinkovitost zgrada u Hrvatskoj

Većina je zgrada u Republici Hrvatskoj građeno do 1987. pa iz tog razloga nemaju odgovarajuću toplinsku zaštitu. Zbog toga ih većina ne zadovoljava ni Tehničke propise iz 1987. što za posljedicu ima velike gubitke topline i potrošnju energije u prosjeku 150 do 200 kWh/m<sup>2</sup>. Navedena je potrošnja karakteristična za zgrade armirano-betonskog zida debljine 25 cm obloženog s unutarnje strane žbukom od 2 cm i s vanjskom žbukom od 3 cm što ih svrstava u energetska razred E. Velika potrošnja energije za sobom vuče i veće emisije CO<sub>2</sub>, zbog toga je potrebno racionalno trošenje dostupnih energenata. Povećanjem toplinsko-izolacijskih karakteristika zgrade moguće je smanjenje ukupnih gubitaka topline za prosječno 30-60%. Odabir mjera vrši se prema vrsti i stanju zgrade, a najbolje je primijeniti više mjera kako bi se osigurao njihov zajednički učinak i kako bi uštede bile što značajnije. [1] Najveći gubitci topline su kroz vanjske zidove i prozore pa se već samo njihovom sanacijom ostvaruju velike uštede. Velike gubitke topline smanjuje i provedba sanacije krova iznad grijanog prostora. Trenutne uštede grijanja mogu se postići uz jednostavne mjere koje nemaju dodatne troškove kao što su gašenje grijanja ili hlađenja noću, spuštavanje roleta, reguliranje temperature za 1 °C, korištenje prirodnog osvjetljenja, gašenje rasvjete kada nije potrebna i dr. Mali troškovi i brzi povrat investicije dovode mjere kao što su brtvljenje prozora i vrata, postavljanje IZO ostakljenja, ugradnja roleta, izoliranje postojećeg krova, ugradnja termostatskih ventila na radijatore, štedne žarulje itd. Mjere koje iziskuju veće troškove i ostvaruju duži povrat investicije su izoliranje vanjske ovojnice zgrade, zamjena prozora i vrata toplinski kvalitetnijim, centraliziranje sustava grijanja i pripreme tople vode, ugradnja solarnih panela itd. [1]



### 3.2. Direktiva (EU) 2024/1275

Prema Pariškom sporazumu, koji je usvojen u prosincu 2015. godine na temelju Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama (UNFCCC), zemlje potpisnice su se obvezale na smanjenje globalne prosječne temperature. Nastoji se održati povećanje porasta prosječne globalne temperature ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, s ciljem daljnjeg smanjenja na 1,5°C. „Europski zeleni plan“, za cilj ima postizanje dogovora iz Pariškog sporazuma. Europska unija obvezala se je smanjiti neto emisije stakleničkih plinova za 55% u cjelokupnom gospodarstvu Europske unije do 2030. godine u odnosu na emisije koje obilježavaju 1990. godinu. „Val obnove za Europu – ozelenjivanje zgrada, otvaranje radnih mjesta, poboljšanje života“ predstavlja svoju strategiju za val obnove. Ova strategija uključuje akcijski plan s ciljem da se do 2030. godine barem udvostruči godišnja stopa energetske obnove zgrada i potaknu dubinske obnove. Navedeno bi omogućilo obnovu 35 milijuna zgrada do 2030. godine, uz otvaranje novih radnih mjesta u građevinskom sektoru. [13]

Prema Direktivi, svaka država članica utvrđuje nacionalni plan obnove s ciljem da do 2050. godine zgrade postanu zgrade s nultim emisijama. [13]

### 3.3. NZEB

Kratice NZEB (eng. *Nearly zero-energy building* – NZEB) predstavlja zgradu gotovo nulte energije, odnosno zgradu koja ima vrlo visoka energetska svojstva. Ta iznimno niska količina potrebne energije pokriva se iz obnovljivih izvora, a uključuje i energiju koja je proizvedena na samoj zgradi ili njezinoj blizini. Sve nove zgrade, za koje se zahtjev za građevinsku dozvolu podnosi nakon 31. prosinca 2019., moraju udovoljavati NZEB zahtjevima. Zgrade u vlasništvu javnog sektora, za koje je zahtjev podnesen nakon 31. prosinca 2017., već su trebale biti projektirane kao NZEB. Zgrade javnog sektora obuhvaćaju objekte u kojima se obavljaju društvene djelatnosti, kao što su obrazovanje, zdravstvo, kultura, te zgrade u vlasništvu javnih tijela i organizacija. Europska komisija dopušta državama članicama da same propišu minimalna svojstva koja zgrade nulte energije moraju zadovoljiti prema vlastitim mogućnostima i na osnovi troškovnih analiza. Za Republiku Hrvatsku su utvrđeni minimalni zahtjevi za nove zgrade, koji uključuju specifičnu godišnju potrošnju energije za grijanje i primarnu energiju. Ovi zahtjevi definirani su za devet vrsta zgrada u kontinentalnoj i primorskoj klimatskoj zoni. Navedeni su zahtjevi prikazani u tablici. [7]

Tablica 1 Specifična godišnja potrošnja energije za grijanje i primarna energija [7]

VRSTA ZGRADE	$Q''_{H,nd}$ [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]						$E_{prim}$ [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	
	NZEB						NZEB	
	kontinentalna, $\Theta_{mm} \leq 3$ °C			primorska, $\Theta_{mm} > 3$ °C			kontinent, $\Theta_{mm} \leq 3$ °C	primorje, $\Theta_{mm} > 3$ °C
	$f_o \leq 0,20$	$0,20 < f_o < 1,05$	$f_o \geq 1,05$	$f_o \leq 0,20$	$0,20 < f_o < 1,05$	$f_o \geq 1,05$		
Višestambena	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_o$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_o$	45,99	80	80
Obiteljska kuća	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_o$	75,00	24,84	$17,16 + 38,42 \cdot f_o$	57,50	45	35
Uredska	16,94	$8,82 + 40,58 \cdot f_o$	51,43	16,19	$11,21 + 24,89 \cdot f_o$	37,34	35	25
Obrazovna	11,98	$3,86 + 40,58 \cdot f_o$	46,48	9,95	$4,97 + 24,91 \cdot f_o$	31,13	55	55
Bolnica	18,72	$10,61 + 40,58 \cdot f_o$	53,21	46,44	$41,46 + 24,89 \cdot f_o$	67,60	250	250
Hotel i restoran	35,48	$27,37 + 40,58 \cdot f_o$	69,98	11,50	$6,52 + 24,89 \cdot f_o$	32,65	90	70
Sportska dvorana	96,39	$88,28 + 40,58 \cdot f_o$	130,89	37,64	$32,66 + 24,91 \cdot f_o$	58,82	210	150
Trgovina	48,91	$40,79 + 40,58 \cdot f_o$	83,40	13,90	$8,92 + 24,91 \cdot f_o$	35,08	170	150
Ostale nestambene	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_o$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_o$	45,99	/	/

Osim zahtjeva  $Q_{H,nd}$  i  $E_{prim}$ , zgrada nulte energije mora zadovoljiti da minimalni udio isporučene energije iz obnovljivih izvora bude 30% te mora biti zadovoljen zahtjev zrakonepropusnosti koji mora biti ispitan prije tehničkog pregleda zgrade. Zgrada gotovo nulte energije treba biti projektirana kako bi minimalizirala energetske potrebe, a za ostvarenje NZEB standarda ne postoji jedinstveno rješenje. Potreban je timski pristup svih struka, od arhitekata do stručnjaka za termo tehniku i elektroinstalacije te od idejnog projekta do izvedbe. Energetski koncept NZEB-a treba biti uključen već u početnoj fazi projektiranja, kako bi se implementirali principi održive arhitekture. Kvalitetan energetski koncept uključuje optimalnu toplinsku izolaciju i sustave, te obaveznu primjenu obnovljivih izvora energije, što rezultira troškovno optimalnim rješenjem. [7]

### 3.3.1. Osnovni principi projektiranja NZEB projektiranja

Zgradu gotovo nulte energije treba projektirati s ciljem minimiziranja energijskih potreba, uz koordinirani pristup svih struka. Energetski koncept NZEB-a mora biti uključen u početnoj fazi projektiranja i uključivati balansiranu toplinsku izolaciju i termotehničke sustave s obnovljivim izvorima energije. NZEB treba biti projektiran s povoljnim faktorom oblika, povoljnim bio klimatskim uvjetima i minimalnim toplinskim mostovima. Troškovno-optimalna rješenja trebaju osigurati visoku učinkovitost uz ekološki prihvatljive i održive materijale. Također, važno je osigurati dobru kvalitetu zraka putem mehaničke ventilacije i pravilnu unutarnju temperaturu kako bi se spriječila šteta od kondenzacije. [7]

Principi projektiranja NZEB zgrada podijeljeni su u pet osnovnih skupina:

- Neprekinuta toplinska izolacija optimalne debljine
- Otvori dobrih toplinskih svojstava sa pripadajućim propuštanjem Sunčeve energije
- Ugradnja mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline
- Ostvarivanje nepropusnosti vanjske ovojnice zgrade
- Minimiziranje toplinskih mostova



Slika 2 Kyoto piramida projektiranja NZEB-a [7]

Kyoto piramida prikazuje strategiju za projektiranje NZEB konstrukcija. Prvi je korak smanjenje toplinskih gubitaka kroz optimizaciju oblika zgrade, toplinsku izolaciju, zrakonepropusnu ovojnicu, ventilaciju s rekuperacijom topline itd. Osim toga, važno je optimalno postavljanje prozora, iskorištavanje dnevnog svjetla i korištenje toplinske mase pomoću koje se toplina akumulira. Sljedeći je korak korištenje energetski učinkovitih uređaja i rasvjetnih sustava. Zatim slijedi korištenje energije Sunca, odnosno pasivnog grijanja i hlađenja, prirodnog osvjetljenja i ventilacije te korištenje topline tla. Prikaz potrošnje energije daje korisnicima poticaj da kontroliraju i smanjuju potrošnju energenata. Odabir obnovljivih izvora energije i smanjivanje uporabe fosilnih goriva zadnji je korak u piramidi. [7]

### 3.3.1.1. Toplinska ovojnica kod NZEB projektiranja

Vanjska ovojnica zgrade čini fizičku barijeru između unutarnjeg kondicioniranog prostora s vanjskim okolišem i unutarnjim nekondicioniranim prostorima, a čine je neprozirni i prozirni dijelovi zgrade. Njezina funkcija je osigurati ugodnu i zdravu unutarnju klimu za korisnike, uključujući kvalitetu zraka, toplinsku udobnost, zvučnu zaštitu i vizualnu ugodnost. Iako se često smatra da veća debljina toplinske izolacije proporcionalno smanjuje toplinske gubitke i troškove energije, to nije uvijek slučaj. Dokazano je da debljina izolacije veća od 20-25 cm ne donosi značajna poboljšanja u uštedi energije za grijanje. Velikim debljinama toplinske

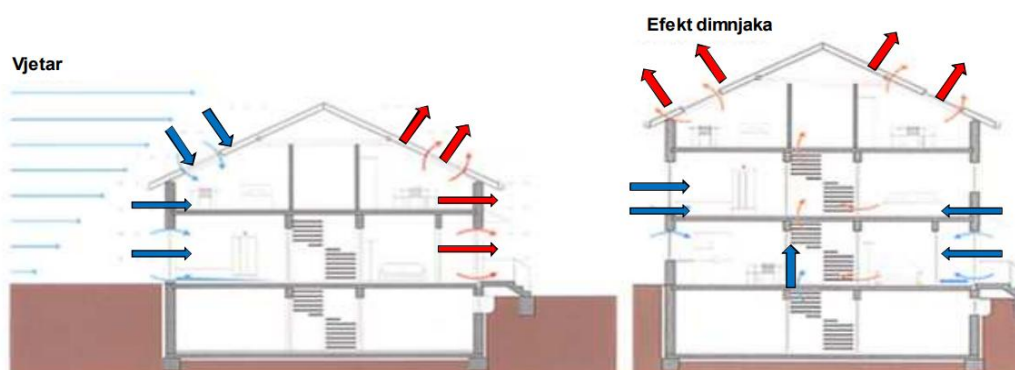
izolacije teško je naći ekonomsko opravdanje. Prikladni odabir materijala ovisi o različitim zahtjevima kao što su zaštita od požara, vanjska ili unutarnja izolacija, prisutnost vlage, zaštita od buke, ekološke i estetske zahtjeve i ekonomičnost. Kada zgrade imaju povećanu zrakonepropusnost, povećava se opasnost od pojave građevinske štete uzrokovane vlagom. Zbog toga je važno procijeniti higrotermalno ponašanje elemenata ovojnice primjenom Glaserove metode kojom se vrši stacionarni proračun i primjenom dinamičke metode HAM modelom. Ukoliko zgrada nije projektirana tako da bude zaštićena od utjecaja vlage, mogu se javiti plijesni i gljivice na građevinskim elementima. [7]

U pravilu je najbolje toplinsku izolaciju izvoditi s vanjske strane zida, a u iznimnim slučajevima radi se s unutarnje strane. Ima više razloga zbog kojih je unutarnja izolacija nepovoljna, a nabrojani su u nastavku:

- Zidovi su nezaštićeni i podvrgnuti velikim temperaturnim razlikama
- Vлага prolazi kroz zidove i dolazi do kondenzacije
- Unutarnja izolacija sprječava da se toplina akumulira u zidovima što dovodi do ubrzanog hlađenja prostora što pogoduje kondenzaciji vlage
- Unutarnja izolacija ne otklanja toplinske mostove [7]

### 3.3.1.2. Zrakonepropusnost vanjske ovojnice

Zrakonepropusnost predstavlja otpor izlasku unutrašnjeg toplog zraka iz zgrade ili ulasku hladnog zraka izvana u zgradu kroz mjesta na ovojnici koja su nastala slučajnim propustima, ali nikako kroz ventilacijski sustav. Ovakav prolazak zraka kroz građevne dijelove javlja se zbog razlike tlaka zraka, a naziva se infiltracija. [7]



Slika 3 Infiltracija i eksfiltracija zraka kroz građevne dijelove [7]

Prije tehničkog pregleda, zgrade moraju biti ispitane na zrakopropusnost. Zrakonepropusnost zgrade ključna je za smanjenje mogućnosti kondenzacije vodene pare unutar građevnih dijelova zgrade. Svjež zrak u zgradi osigurava se pomoću mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline.

Propuštanja zraka koja dovode do kondenzacije vodene pare su:

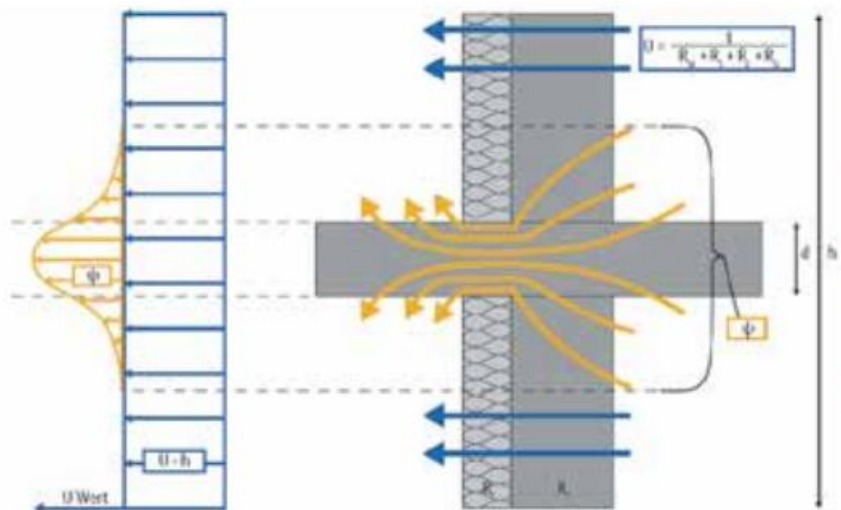
- Tok zraka iznutra prema van zbog velike apsolutne vlage zraka
- Pri maloj brzini protoka zraka
- Pri dugačkom putu strujanja

Važno je razlikovati paronepropusnu ovojnicu zgrade koja sprječava difuziju vodene pare i zrakonepropusnu ovojnicu čija je funkcija spriječiti infiltraciju zraka. Zrakonepropusna ovojnica, kao što je na primjer vapneno cementna žbuka, može propuštati difuziju vodene pare. [7]

### 3.3.1.3. Toplinski mostovi kod NZEB projektiranja

Toplinski mostovi predstavljaju specifična mjesta u vanjskoj ovojnici zgrade gdje dolazi do većeg prijenosa topline u odnosu na ostatak konstrukcije, što rezultira nižom unutrašnjom temperaturom. Ova pojava postaje posebno očita kada postoji velika razlika između unutarnje i vanjske temperature, obično tijekom zimskih mjeseci. Toplinski mostovi često uzrokuju probleme poput kondenzacije na unutarnjim površinama, nakupljanja prašine, te stvaranja plijesni i gljivica, što može predstavljati prijetnju zdravlju. U manje izraženim oblicima, toplinski mostovi mogu izazvati veće gubitke topline, čime se smanjuju toplinsko-izolacijske karakteristike zgrade i utječe na udobnost boravka u prostorijama. Fizikalna karakteristika toplinskog mosta je da se linije prijenosa temperature na tom mjestu iskrivljuju, dok su u homogeni dijelovima konstrukcije paralelne. Na heterogenim konstrukcijama, gdje se spajaju različiti materijali, razlike u temperaturama uzrokuju promjene smjera toplinskog toka, što dovodi do odstupanja od paralelnog prijenosa topline. [4]

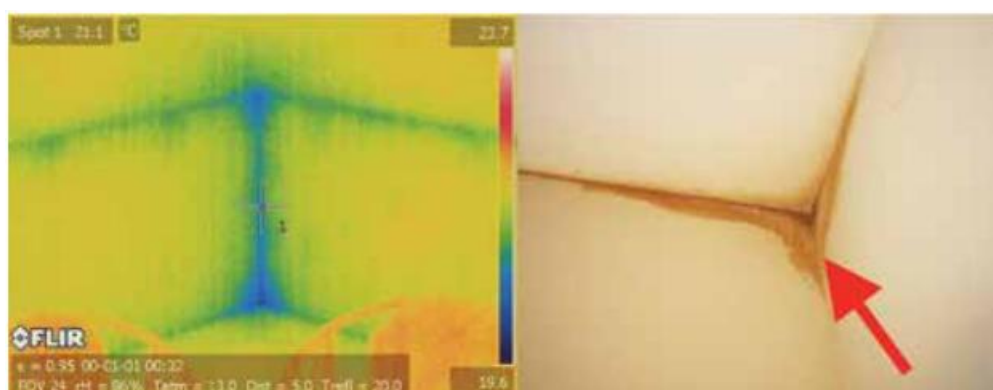
Zgrada mora biti projektirana i izgrađena tako da maksimalno smanji utjecaj toplinskih mostova na godišnju potrebu energije za grijanje i hlađenje, te da se izbjegne nastajanje građevinskih oštećenja poput kondenzacije unutar prostora ili na površinama u uvjetima predviđenim projektom. Utjecaj toplinskog mosta očituje se kao promjena u toplinskom toku na određenom dijelu konstrukcije. Linijski toplinski mostovi označavaju se simbolom  $\Psi$  (psi), a mjere se u jedinicama  $W/(mK)$ , dok točkasti toplinski mostovi imaju oznaku  $\chi$  (hi) i mjere se u  $W/K$ . [4]



Slika 4 Povećani toplinski tok [7]

Na slici je prikazan povećani toplinski tok zbog promjene geometrije i materijala građevnog dijela. Toplinske mostove je nemoguće u potpunosti ukloniti iz vanjske ovojnice zgrade, ali se mora minimizirati njihov utjecaj uz prihvatljive tehnološke mogućnosti.[7] Iako se od 2006. godine povećava debljina toplinskih izolacija i smanjuju transmisijski gubici, rješenja za zaštitu zona toplinskih mostova često nisu u skladu s tim trendom, uglavnom zbog nedostatka znanja među projektantima, izvođačima i investitorima. [1]

Kod zgrada s debelom toplinskom izolacijom koje nemaju mehaničku ventilaciju s rekuperacijom izražen je utjecaj toplinskih mostova zbog visoke relativne vlažnosti zraka u prostoriji. [7]



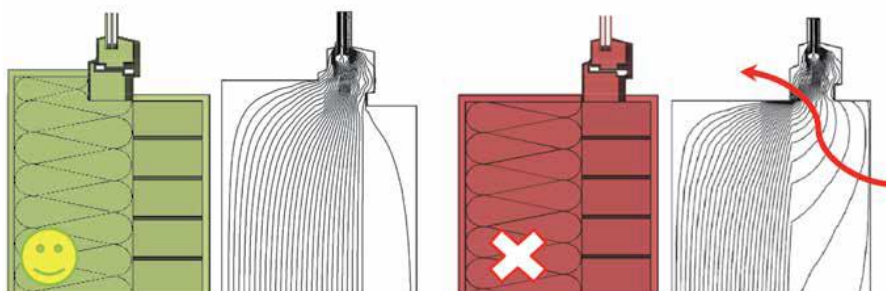
Slika 5 Termogram toplinskog mosta i fotografija posljedica [7]

### 3.3.1.4. Toplinska masa zgrade

Pri odabiru sustava gradnje za NZEB zgrade, važno je uzeti u obzir i "toplinsku masu" ili toplinsku inerciju, odnosno sposobnost građevnih dijelova da akumuliraju toplinu. Ova sposobnost omogućava materijalima da pohrane toplinu koju primaju i kasnije je oslobode, čime se regulira temperatura prostora. Ovaj fenomen posebno je koristan tijekom zimskih mjeseci, kada grijanje nije stalno, već se često isključuje noću. Akumulirana toplina pomaže u održavanju ugodne temperature u prostorijama bez velikih padova noću. Količina akumulirane topline ovisi o temperaturnoj razlici između građevnog elementa i okolnog zraka, kao i o specifičnom toplinskom kapacitetu materijala. Za optimalnu akumulaciju, materijale s većom masom treba postaviti unutar slojeva građevnih dijelova, dok toplinsku izolaciju treba smjestiti na vanjsku stranu vanjske ovojnice. Parametri dinamičke toplinske inercije zgrade uključuju vremenski pomak i smanjenje amplitude, koji su ključni za procjenu sposobnosti pohrane toplinske energije u elementima vanjske ovojnice. Ovi parametri izravno utječu na udobnost unutarnjeg prostora i efikasnost potrošnje energije.

### 3.3.1.5. Prozori kod NZEB projektiranja

Prozori su elementi vanjske ovojnice zgrade koji omogućuju prozračivanje i osvjetljivanje unutarnjeg prostora i propuštanje sunčeve energije. Istovremeno propuštaju sunčevu energiju i štite od vanjskih utjecaja i gubitaka topline. Gubitke kroz prozore dijelimo na transmisijske gubitke i gubitke ventilacijom. [1] Tehnički propis iz 2020. godine propisuje maksimalni koeficijent topline  $U=1,6 \text{ W/m}^2$  (Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama 2020.) Na starim je zgradama  $U$  vrijednost prozora kreće se od 3,00 do 3,50  $\text{W/m}^2\text{K}$ . Kod NZEB zgrada preporučuje se otpor prolasku topline  $U= 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kod same ugradnje prozora bitno je osigurati dobro brtvljenje, prekid toplinskog mosta u okviru i nizak koeficijent prolaska topline. Slika prikazuje kako način ugradnje prozora utječe na toplinske mostove. [7]



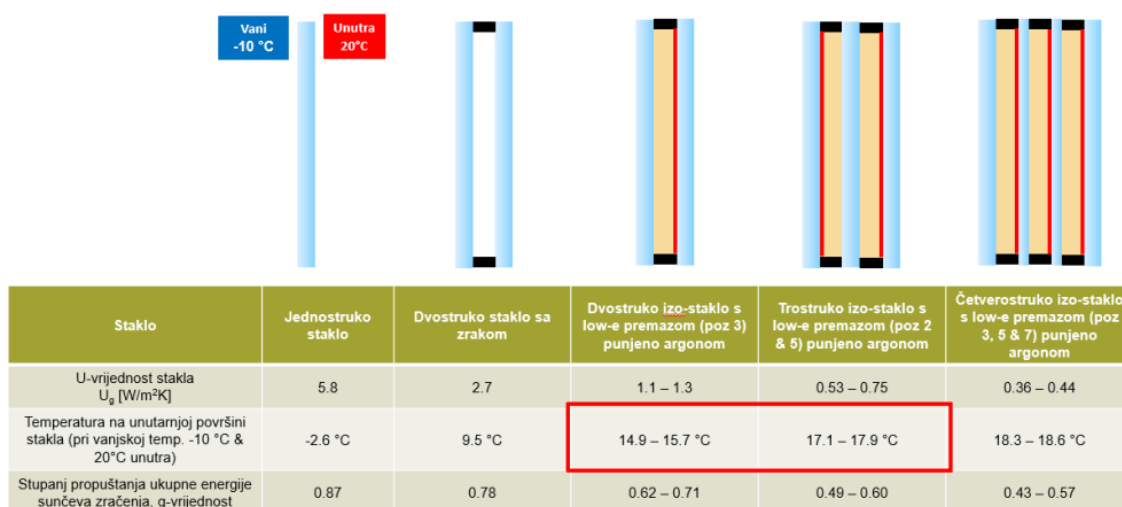
Slika 6 Ugradnja prozora [7]

Stakla prozora mogu se izraditi kao izolacijska, dvoslojna i troslojna te s različitim plinovima (xenon, argon, kripton) u međuprostoru. U-koeficijent moguće je smanjiti većim brojem međuprostora i većom širinom međuprostora. Na staklo se nanosi nevidljiv, tanak sloj većinom srebrnih oksida koji sprječava izlaženje dugovalnog toplinskog zračenja, a u isto vrijeme smanjuje dobitke od sunčevog zračenja. Za što veću učinkovitost potrebno je i pametno locirati prozore na samim građevinama. Na južnom bi pročelju prozori trebali biti najveći, dok bi na sjevernom trebali biti najmanji. [1] Dobitci od Sunčeva zračenja doprinose smanjenju potrebne energije za grijanje zimi, dok povećavaju potrebe za hlađenje ljeti. [7]

Prilikom projektiranja novih NZEB objekata, važno je uravnotežiti solarne toplinske dobitke i gubitke topline kroz prozore i ostale staklene dijelove vanjske ovojnice zgrade. Ovisno o specifičnostima lokacije, poput klime, orijentacije, veličine prozora, vrste stakla, okvira i rubova stakla, kao i mogućnosti zasjenjenja, potrebno je pronaći optimalno rješenje koje osigurava energetska ravnotežu kako u zimskom, tako i u ljetnom razdoblju. S obzirom na to da ne postoji univerzalni pristup za odabir vrsta prozora, odabir ovisi o specifičnostima svakog objekta i njegove lokacije (hladna, umjerena ili vruća klima). Postizanje optimalne energetske ravnoteže prozora ključno je za ispunjavanje zahtjeva NZEB standarda. [7]

Uravnoteženje toplinskih gubitaka i dobitaka kroz prozore postiže se razmatranjem  $U_w$  vrijednosti prozora, koja definira transmisijske gubitke topline, te  $g$  vrijednosti stakla, koja označava solarne dobitke topline. Ova dva faktora imaju ključan utjecaj na godišnju potrošnju energije za grijanje i hlađenje zgrade. Osim samog ostakljenja i okvira prozora, velik utjecaj na  $U_w$  faktor ima i sam rub stakla. Kod NZEB zgrada najčešće se koristi trostruko izo staklo. Prednosti ovog stakla su bolja toplinska izolacija, odnosno manja  $U_g$  vrijednost. Koja se može dobiti korištenjem premaza za stakla, povećanjem razmaka između stakala i plinskim ispunjenjima. Ova kombinacija rezultira višom površinskom temperaturom na unutarnjoj strani stakla, što poboljšava osjećaj udobnosti unutar prostora, osobito u NZEB-u. Nedostaci trostrukog izo stakla su da stakla veće mase mogu otežati otvaranje prozora, iako se to može riješiti kvalitetnijim tehničkim rješenjima. [7]





Slika 7 Prikaz temperature na površini stakla ovisno o U vrijednosti, broju i poziciji low e premaza [11]

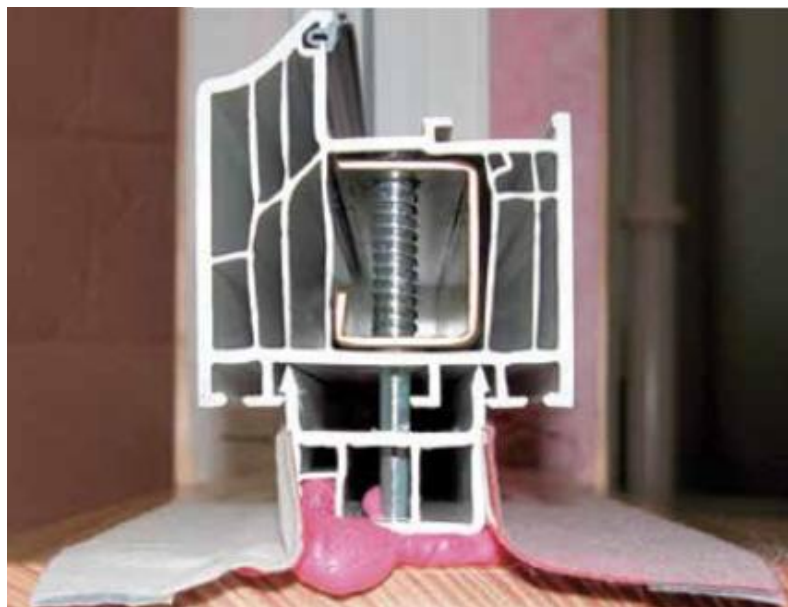
Strategija za ispravan odabir vrste stakla za NZEB projektiranje može biti:

- Za hladne klime potrebno je omogućiti što veći ulazak sunčeve svjetlosti u prostor (veća vrijednost  $g_{\perp}$ ) i minimizirati toplinske gubitke (niža  $U_w$  vrijednost)
- Za tople klime potrebno je smanjiti ulazak sunčevih zračenja u prostor (niža vrijednost  $g_{\perp}$ ), pri čemu je moguće dozvoliti nešto veće transmisijske gubitke topline (viša  $U_w$  vrijednost).

Loša ugradnja može uzrokovati povećane gubitke topline (zbog smanjenje zrakonepropusnosti i nastanka toplinskih mostova), te može dovesti do građevinske štete, poput propuha ili stvaranja plijesni, što negativno utječe na zdravlje i udobnost stanovanja. Pravilna je ugradnja poznatija kao RAL ugradnja. [7] Općenito, RAL pravila za montažu prozora često se smatraju strogo definiranim, s preciznim uputama za materijale i način ugradnje, no u stvarnosti to nije potpuno točno. Sama definicija montaže svodi se na osnovnu ideju koja glasi: element mora biti postavljen na način koji neće ugroziti zdravlje i sigurnost ljudi koji koriste prostor. U konačnici, sve se svodi na osiguranje statičke stabilnosti elemenata, prijenos opterećenja na konstrukciju ovojnice, te osiguranje potrebnog prostora za dilataciju materijala zbog temperaturnih promjena. Također, važno je da sile koje nastaju u objektu ne budu prenesene na prozorski element.

S obzirom na to, montiranje mora obuhvatiti tri razine brtvljenja:

- unutarnja – zrakonepropusna i paronepropusna
- srednja – toplinska i zvučna izolacija
- vanjska – vodonepropusna, a paropropusna [12]



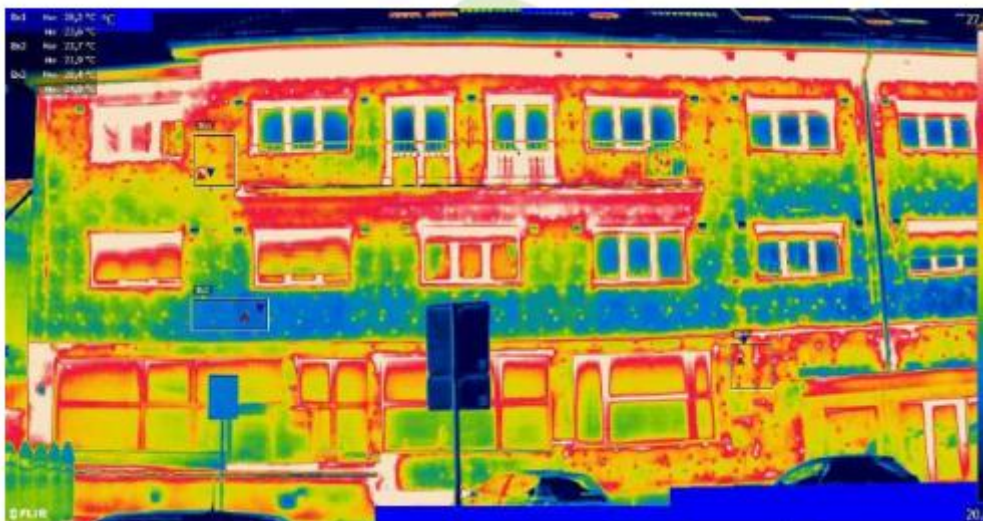
Slika 8 Pravilna ugradnja prozora [12]

#### 3.3.1.6. Ispitivanje zrakopropusnosti

Za zgrade gotovo nulte energije obvezno je provođenje ispitivanja zrakopropusnosti (poznato kao *Blower door test*), koje se mora realizirati prema propisanoj normi prije tehničkog pregleda zgrade. Zrakopropusnost se mjeri analizom protoka zraka kroz vanjsku ovojnicu, uzimajući u obzir razliku tlakova s obje strane. U tu svrhu koristi se uređaj *Blower door* koji stvara prisilnu razliku tlakova između unutarnjeg i vanjskog prostora. Standardna razlika tlakova koja se koristi u procjeni iznosi 50 Pa, što odgovara uvjetima vjetrova brzine od 35 km/h koji istovremeno djeluje sa svih strana zgrade. Ova razlika tlakova dovoljno je velika da eliminiira šum i druge faktore koji mogu utjecati na točnost mjerenja, kao što su promjene temperature zraka ili slab vjetar. Takav pristup osigurava visoku preciznost i ponovljivost mjerenja. [7]

### 3.3.1.7. Infracrvena termografija

Termografske kamere detektiraju infracrveno zračenje unutar elektromagnetskog spektra, u rasponu od približno 0,9 do 14 mikrometara. S obzirom na to da sva tijela emitiraju infracrveno zračenje u ovisnosti o njihovoj temperaturi, prema zakonu zračenja crnog tijela, termografska tehnologija omogućava "viđenje" okoliša i u uvjetima gdje nije potrebno vidljivo svjetlo. Korištenjem termografske kamere, topli objekti jasno se izdvajaju od hladnije pozadine, što omogućava lakše prepoznavanje ljudi i toplokrvnih životinja, kako tijekom dana, tako i noću. Uz pomoć termografije mogu se otkriti nedostaci u konstrukciji poput nehomogenosti zidnih materijala, neispravnosti ili nedostatka toplinske izolacije, vlage u zidovima, problema s ravnim krovovima, toplinskih mostova, nepropusnosti za zrak, fuga i slično, kao i koncentracija instalacija unutar zidova. Također, infracrvena termografija omogućava detekciju manjih oštećenja ili curenja instalacija ugrađenih u zidove ili energetske kanale, uključujući eventualne nedostatke u izolaciji tih sustava, što nije moguće utvrditi običnim vizualnim pregledom. Termografska snimanja dijelova konstrukcije omogućuju brzu identifikaciju problema vezanih uz toplinske karakteristike, otkrivanje uzroka i prijedlog za sanaciju. Za pravilno snimanje i interpretaciju termograma, potrebno je obučeno i certificirano osoblje. [13]



Slika 9 Termogram vanjske ovojnice zgrade s izraženim toplinskim mostovima [11]

### 3.4. Energetska obnova zgrada kulturne baštine

Direktivom 2012/27/EU Europskog parlamenta i Vijeća, Hrvatska se je obvezala povećati energetska učinkovitost za 20% do 2020. godine i nastaviti s poboljšanjima nakon toga. Ministarstvo kulture osigurava integraciju kulturnih dobara u energetske obnove na prihvatljiv način, uz zaštitu okoliša i održivi razvoj, što je i temelj Europske unije. Energetska obnova kulturne baštine mora poštovati zakonodavne okvire i očuvanje njezinih svojstava. Osim što povećava energetska učinkovitost, energetska obnova kulturne baštine ima i druge koristi, kao što su smanjenje troškova održavanja, revitalizacija zapuštenih objekata, uklanjanje štetnih zahvata na kulturnoj baštini koji ugrožavaju njegove vrijednosti, poboljšanje kvalitete i udobnosti korištenja te usklađivanje objekata u povijesnim područjima s okolnim prostorom što unaprjeđuje vrijednost zaštićene cjeline. [10]

Preporuke omogućuju:

- ujednačene kriterije za primjenu energetske učinkovitosti
- podizanje svijesti i stručnih kapaciteta konzervatorske službe
- bolju informiranost i suradnju među dionicima
- izradu smjernica za implementaciju mjera energetske učinkovitosti.

#### 3.4.1. Postupak primjene mjera energetske učinkovitosti na graditeljskoj baštini

Mjere energetske učinkovitosti obuhvaćaju energetska pregled i certificiranje zgrade ili njenog dijela, kao i osnovne zahtjeve energetske obnove. To uključuje izradu projektne dokumentacije koja dokazuje uštede energije, poboljšanje toplinske zaštite zgrade, unaprjeđenje tehničkih sustava kao što su grijanje, hlađenje, ventilacija, klimatizacija, priprema tople vode, sustav rasvjete, automatizacija zgrade te implementacija sustava obnovljivih izvora energije. Prema hrvatskoj normi HRN EN 16883, koja se odnosi na očuvanje kulturne baštine i smjernice za poboljšanje energetske učinkovitosti povijesnih zgrada (EN 16883: 2017), definirani su svi ključni pojmovi, principi i postupci vezani uz planiranje, gradnju i energetska obnova objekata. [10]

### 3.4.1.1. Pripremni dio postupka

Proces energetske obnove zgrade počinje preliminarnom analizom njezine energetske učinkovitosti i identifikacijom energetske potencijala, nakon čega slijedi izrada prijedloga za energetske obnovu.

Prijedlog koji pripremaju projektanti uz odobrenje Ministarstva kulture sadrži sljedeće podatke:

- osnovne informacije o zgradi
- status kulturnog dobra i identifikacija
- konstruktivno stanje zgrade
- stanje vlage u zidovima i temeljima
- prethodni zahvati na zgradi
- detalji o grijanom dijelu zgrade i svim tehničkim sustavima (strojarski i elektrotehnički sustavi)
- arhitektonski snimak postojećeg stanja i podjela na toplinske zone
- proračun i ocjena fizikalnih svojstava zgrade u odnosu na energetske učinkovitost i toplinsku zaštitu
- energetska analiza
- prijedlog mjera za poboljšanje energetske stanja. [10]

### 3.4.1.2. Energetska obnova zgrada koje imaju status zaštićenog kulturnog dobra

Sve mjere energetske učinkovitosti nije moguće primijeniti na zgrade koje imaju status kulturnog dobra. Međutim, pažljivim planiranjem, korištenjem naprednih tehnologija i odabirom prikladnih rješenja moguće je poboljšati energetske učinkovitost svake takve zgrade, pod uvjetom da se odaberu mjere koje ne ugrožavaju vrijednosti i obilježja zbog kojih je zgrada proglašena kulturnim dobrom. [10]

### 3.4.1.3. Protokoli i procedure

Prijedlog mjera energetske obnove zgrade izrađuje ovlaštenu projektanta s dopuštanjem Ministarstva kulture, temeljen na energetske pregledu i spomeničkim svojstvima zgrade. Ako postoje podaci o prethodnim radovima, oni se integriraju u prijedlog. Nakon izrade prijedloga, potrebno je zatražiti stručno mišljenje od konzervatorske odjela koji analizira vrijednosti kulturnog dobra i procjenjuje utjecaj predloženih mjera na te vrijednosti. Ako su potrebna dodatna konzervatorska istraživanja, ona se provode prema preciznim uputama

konzervatorskog odjela. Stručno mišljenje s konzervatorskim smjernicama dostavlja se podnositelju zahtjeva. Ako projektant ili vlasnik podnese zahtjev bez prethodnih istraživanja, konzervatorski odjel može odbiti izdavanje posebnih uvjeta. Ukoliko zahvati mijenjaju temeljne zahtjeve ili usklađenost s lokacijskim uvjetima, potrebno je zatražiti lokacijsku informaciju od nadležnog odjela. Suglasnost ministarstva nadležnog za graditeljstvo može se izdati za odstupanja od temeljnih zahtjeva ako bi to narušilo spomenička svojstva. [10]

#### 3.4.1.4. Preporuke za izradu projekta energetske obnove zgrade

Projektiranje energetske obnove zgrade je složen proces koji zahtijeva interdisciplinarni pristup i stalnu suradnju svih relevantnih struka. Cilj je uravnotežiti uvjete za buduće korištenje zgrade, poboljšanje njezine energetske učinkovitosti te očuvanje kulturnih vrijednosti. Predviđeni zahvati moraju biti minimalni, neinvazivni i, ako je moguće, reverzibilni, kako bi se dugoročno očuvala autentičnost zgrade. U tom kontekstu, važno je pažljivo primijeniti tradicionalne i suvremene metode za zaštitu kulturnog dobra. Na temelju istraživanja, nije uvijek moguće postići unaprijed definirane postotke uštede energije, pa je nužno prilagoditi mjere energetske obnove svakom pojedinačnom objektu. Ako energetska učinkovitost nije zadovoljena samo mjerama na ovojnici, preporučuje se dodatno uvođenje tehničkih sustava. [10]

### 3.4.2. Mjere energetske obnove kulturne baštine

#### 3.4.2.1. Povećanje toplinske zaštite zidova

Pročelja zgrada često imaju arhitektonske značajke koje odražavaju estetske i povijesne vrijednosti, zbog čega oblaganje vanjskih zidova radi poboljšanja toplinske zaštite nije uvijek prihvatljivo. Kod zgrada s dekorativnim pročeljima, kao i onih u kojima je materijal pročelja oblikovni element, nije dopuštena vanjska intervencija koja bi značajno promijenila izgled. Geometrija pročelja, otvori i odnos prema krovu također su važni za očuvanje autentičnosti. U slučajevima gdje oblaganje nije moguće, preporučuje se sanacija zidova ili primjena suvremenih izolacijskih materijala koji podržavaju očuvanje kulturnih vrijednosti. Na jednostavnijim pročeljima ili zgradama koje nisu pojedinačno zaštićene, povećanje toplinske izolacije može biti prihvatljivo. [10]

### 3.4.2.2. Povećanje toplinske zaštite krovova

Krovne konstrukcije kao i ostali dijelovi konstrukcije zgrade jedan su od bitnih dijelova zgrada i važni su svjedoci tehnologije građenja i obrtničkih dosegâ. S konzervatorskog stajališta izvorne krovne konstrukcije bitno je sačuvati nepromijenjene, u njihovim izvornim oblicima. Istodobno, one pružaju izvjesne mogućnosti za povećanje toplinske zaštite, koja može bitno poboljšati energetska svojstva zgrade. Pri tome je bitno sačuvati izgled krovišta, njegovu geometriju i karakteristične detalje izvedbe pojedinih dijelova, kako izvana tako i iznutra. Ravni krovovi također pružaju mogućnosti povećanja toplinske zaštite, pri čemu je nužno sačuvati karakteristične vanjske detalje izvedbe krova u skladu sa njihovim značenjem za vrijednost i cjelovitost zgrade. [10]

### 3.4.2.3. Povećanje toplinske zaštite međukatnih konstrukcija

Međukatne konstrukcije su važan element zgrada. Povećanje toplinske zaštite iznad ili ispod njih prihvatljivo je ako ne utječe na vrijedne elemente interijera, poput konstrukcija, obloga i štukatura. Ako konstrukcija oblikuje interijer, treba očuvati njezinu izvornost uz potrebna poboljšanja. Povećanje toplinske zaštite podnih konstrukcija u kontaktu s tlom također je prihvatljivo, pod uvjetom da se ne oštećuju vrijedni dijelovi koji se mogu ponovno postaviti nakon zahvata. Zaštita od vlage obično se rješava uklanjanjem postojećih slojeva poda. Povećanje toplinske zaštite ravnih stropnih konstrukcija moguće je u zoni krovišta, bez značajnog utjecaja na korisnu visinu prostora. Svodne konstrukcije mogu se izolirati s gornje strane, uz minimalne promjene podova iznad. [10]

### 3.4.2.4. Vanjska stolarija

Vanjska stolarija važan je element oblikovanja pročelja i ima ključnu ulogu u definiranju karakteristika kulturnog dobra, stoga treba biti očuvana i obnavljana kada je to moguće, uzimajući u obzir stanje stolarije. Potrebno je redovito održavanje, uključujući popravke i zamjenu dotrajalih dijelova, uz poboljšanje energetske učinkovitosti postojećih dijelova bez narušavanja izgleda i integriteta zgrade. Energetske mjere mogu uključivati minimalne intervencije, poput ugradnje IZO-stakla na dvostruku stolariju ili dodatne elemente na jednostrukoj stolariji, dok se vanjska stolarija obnavlja u izvornom obliku. Ako je zamjena nužna zbog lošeg stanja, nova stolarija mora odgovarati izvornom obliku uz očuvanje svih vrijednih karakteristika. Okove je također potrebno sačuvati i, ako je nužna zamjena, izraditi prema originalnim uzorcima. Za manje zaštićene zgrade, obnova stolarije treba biti usklađena s tehničkim zahtjevima energetske učinkovitosti, uz očuvanje izvornog izgleda. [10]

### 3.4.2.5. Povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i obnovljivi izvori energije

Povećanje energetske učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i korištenje obnovljivih izvora energije zahtijevaju prilagodbu tehničkih sustava specifičnostima zgrade. Ako zgrada već ima postojeći sustav koji je integralni dio njezine povijesti, potrebno je procijeniti mogućnost vraćanja u funkciju izvornog sustava ili njegovu prilagodbu suvremenim rješenjima. Preporučuje se korištenje obnovljivih izvora energije, kao i alternativnih sustava, pod uvjetom da ne ugrožavaju kulturne vrijednosti. Odabir tehnologije trebao bi biti temeljen na stručnim analizama energetske svojstava zgrade, a sustavi trebaju biti lako zamjenjivi i reverzibilni. [10]

Obnovljivi izvori energije uključuju sunčevu energiju, vjetar, hidroenergiju, biomasu i geotermalnu energiju, dok alternativni sustavi obuhvaćaju, daljinsko grijanje, dizalice topline i druge inovativne tehnologije. Kod ugradnje sustava treba se pažljivo razmotriti njihov utjecaj na izgled zgrade, zvučnu izolaciju te arhitektonsku integraciju. [10]

Solarni paneli mogu biti prihvaćeni u iznimnim slučajevima, pod uvjetom da se ne narušavaju vizualne vrijednosti zgrade, dok su postavljeni sustavi na krovovima obavezni biti u skladu s arhitektonskim oblikovanjem. Toplinske pumpe mogu crpiti toplinu iz zraka, vode ili zemlje, a njihova ugradnja zahtijeva pažljivo planiranje kako bi se očuvala povijesna građevinska svojstva i okoliš. Prije početka radova, posebnu pažnju treba posvetiti arheološkim potencijalima na lokaciji, a u slučaju potrebe, obaviti zaštitna arheološka istraživanja. [10]

Sunčevu energiju, ključnu za život na Zemlji, čovjek je prvo koristio za proizvodnju toplinske energije, a otkriće fotonaponskog efekta u 19. stoljeću omogućilo je razvoj solarnih ćelija i proizvodnju električne energije. Iako je ova tehnologija nekoć bila skupa i primjenjivana uglavnom u svemirskim programima, danas je sve dostupnija. Solarni paneli, koji nemaju emisiju štetnih plinova tijekom upotrebe i traju 20 do 30 godina, postaju sve popularniji. Iako je silicij najzastupljeniji materijal za izradu panela, budućnost će zahtijevati recikliranje zbog mogućeg nedostatka sirovina. Solarna ćelija apsorbira sunčevu svjetlost, čime se zbog fotonaponskog efekta stvara napon na njenim krajevima, čineći je izvorom električne energije. Poluvodički materijali u PN-spoju omogućuju protok struje u jednom smjeru, stvarajući jednosmjernu struju koja se pretvara u izmjeničnu za svakodnevnu upotrebu. Danas je najvažniji materijal za proizvodnju solarnih ćelija silicij, posebno u obliku monokristalnog i polikristalnog silicija, dok se koristi i tehnologija tankih filmova. Osim silicija, za poboljšanje učinkovitosti, solarne ćelije mogu sadržavati materijale poput indija, galija, germanija, srebra, zlata, bakra, kadmija, telurija i selenija. [6]

Solarni paneli imaju brojne prednosti koje su nabrojane u nastavku:



- Isplativost investicije u razdoblju od pet do deset godina
- Neovisnost o mreži u slučaju nestanka struje
- Laka zamjena modula u slučaju oštećenja
- Nema dodatnih troškova nakon otplate i niski troškovi održavanja
- Mogućnost postavljanja u nenaseljenim područjima i otocima čime se može izbjeći priključivanje na mrežu [6]

S druge se strane javljaju nedostaci solarnih panela:

- Ovisnost o klimatskim uvjetima, broju sunčanih dana i sjeni susjednih objekata
- Nepristupačnost krovšta može otežati instalaciju
- Nema proizvodnje struje noću
- Suvišak energije mora se preusmjeriti u mrežu
- Problemi s recikliranjem solarnih panela [6]

### 3.5. Utjecaj građevnih materijala na okoliš i emisiju CO<sub>2</sub>

Razvoj industrije građevinskog materijala u posljednja dva desetljeća povećao je potrošnju energije i emisiju stakleničkih plinova. Građevinarstvo, koje se oslanja na beton, koristi velike količine prirodnih resursa poput kamena, pijeska i vode, a proizvodnja i rušenje izazivaju nastanak velike količine otpada. Cement zahtijeva veliku potrošnju energije i emitira CO<sub>2</sub>, koja čini oko 7% ukupne emisije tog plina. Zbog globalnog zatopljenja, postoji potreba za razvojem tehnologija koje će smanjiti emisiju CO<sub>2</sub>. Održivu gradnju postićemo izborom materijala koji imaju najmanji utjecaj na okoliš uzevši u obzir njihov cijeli životni ciklus. Doprinos održivoj gradnji ostvaruje se pažljivim odabirom materijala za građenje, pri čemu je osnovni princip da svaki građevinski materijal treba imati minimalan negativan utjecaj na okoliš, uzimajući u obzir njegov životni ciklus, od iskorištavanja sirovina za proizvodnju do krajnjeg odlaganja iskorištenih materijala. U fazi proizvodnje ključno je pratiti sve ulazne i izlazne parametre, uključujući potrošenu energiju, transport, emisiju štetnih tvari i utjecaj otpada nastalog tijekom proizvodnje. [16]

Istraživanja u građevinskoj industriji trebaju biti usmjerena na pronalaženje materijala koji osiguravaju bolju kvalitetu okoliša i održivost, uz minimiziranje iscrpljivanja prirodnih resursa, smanjenje emisije plinova i otpada. Također, važno je razviti bazu podataka o građevinskim materijalima koja uključuje okolišne kriterije, a ne samo tehnička svojstva i cijenu. Okolišna procjena uskoro bi trebala postati sastavni dio procjene i certifikacije materijala. [5]

Analizom odabira sirovina i resursa za proizvodnju građevinskog materijala treba obuhvatiti:

- Upotrebu obnovljivih materijala naspram neobnovljivih
- Učinkovitost resursa korištenjem manje količine materijala
- Ponovnu upotrebu materijala
- Korištenje recikliranih materijala i ostataka iz proizvodnje
- Odabir materijala koji se mogu reciklirati [16]

#### 3.5.1. Procjena održivosti betona

Prema Gayanu, metodologija za ocjenu održivosti betona dijeli se na osam faktora.

Prvi faktor označuje sadržaj otpadnog, ponovno upotrijebljenog i recikliranog materijala. U ukupnoj masi betonske mješavine važno je odrediti količinu materijala koji se može ponovo koristiti, reciklirati ili koji je otpadni. Primjeri materijala koji se mogu ponovno koristiti uključuju opeku i drvo, dok reciklirani materijali mogu obuhvatiti otpadne gume, otpad nastao rušenjem betonskih struktura te leteći pepeo. [16]

U svrhu očuvanja prirodnih resursa i povećanja uporabnog vijeka građevine razmatra se uporaba brzo obnovljivih materijala i proizvoda velike trajnosti koji zahtijevaju malo održavanja ili čija fizikalna i mehanička svojstva pridonose smanjenju uporabe dodatnih sirovina. To su primjerice betoni s dodatkom pigmenta ili bijeli betoni. Tom aspektu također doprinose betoni povećane trajnosti kojima se povećava uporabni vijek konstrukcije. [16]

Smanjenje uporabe toksičnih proizvoda i drugih štetnih emisija je treći faktor u ovoj metodologiji. Procjenjuje se je li proizvodnjom betona smanjena toksičnost i druge štetne emisije. Također je važno procijeniti smanjuje li se uporabom betona onečišćenje za vrijeme održavanja konstrukcije, rabe li se tvari koje smanjuju ozon u atmosferi i dr. [16]

Očuvanje energije i vode uključuje razmatranje proizvoda čija fizikalna svojstva doprinose smanjenju potrošnje energije i/ili smanjenju potrebe za održavanjem sustava grijanja i hlađenja. Primjeri takvih materijala uključuju izolacijske betone, lagane betone, toplinske panele i slične proizvode. Ova kategorija također obuhvaća procjenu u kojoj mjeri proizvod doprinosi očuvanju vode, poput proizvoda u sustavima za prikupljanje kišnice ili opreme koja ostvaruje izvanrednu energetska učinkovitost. Također se razmatra upotreba zelenih krovova, betonskih kolnika i svijetlih arhitektonskih betona, koji dodatno pridonose očuvanju resursa. [16]

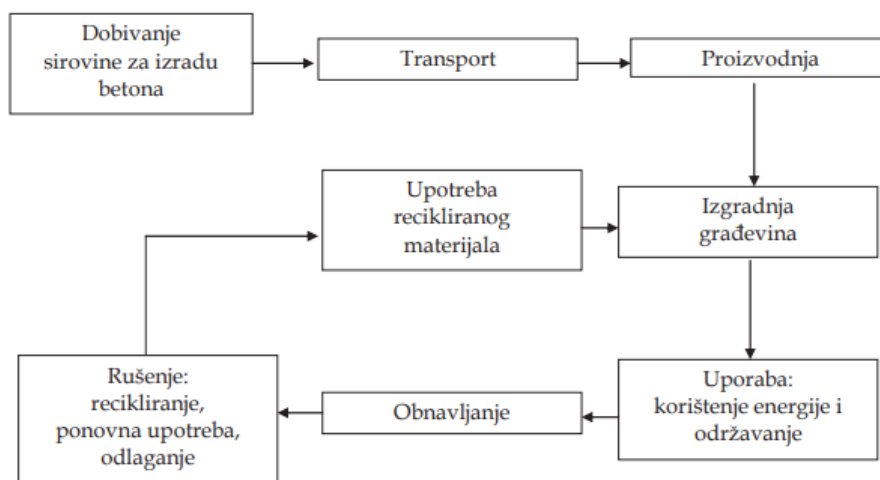
Doprinos sigurnosti i zdravlju radne okoline procjenjuje se na temelju osiguravanja zdrave unutarnje okoline uporabom betona, u kojoj ne dolazi do propuštanja štetnih tvari u zgradu niti do razvoja i disperzije tih tvari. Također, razmatra se eliminacija štetnih tvari i promicanje sigurnosti i zdravlja tijekom građevinskih radova. Važno je i osigurati odgovarajuću osvjetljenost interijera, kontrolirati razinu buke te općenito poboljšati uvjete korištenja prostora. [16]

Doprinos smanjenju emisije CO<sub>2</sub> ocjenjuje se kroz analizu smanjenja emisije CO<sub>2</sub> postignutog primjenom novih tehnologija ili postupaka tijekom procesa dobivanja sirovine, proizvodnje, ugradnje ili bilo kojeg segmenta uporabnog vijeka. Smanjenje emisije CO<sub>2</sub> mora biti mjerljivo i jasno kvantificirano kako bi se procijenio stvarni doprinos smanjenju negativnog utjecaja na okoliš. [16]

Ekobodovi se provjeravaju na temelju usklađenosti proizvoda s kriterijima održivosti prema relevantnim sustavima certificiranja, poput BREEAM-a ili LEED-a. [16]

U posljednjem se faktoru ocjenjuju druge karakteristike proizvoda ili tvrtke, a u njega spadaju mjere kao što su sustav upravljanja okolišem, inicijative za unaprjeđenje procesa projektiranja, metode smanjenja otpada, smanjenje zagađenja i drugi relevantni aspekti koji pridonose održivosti i ekološkoj prihvatljivosti. [16]

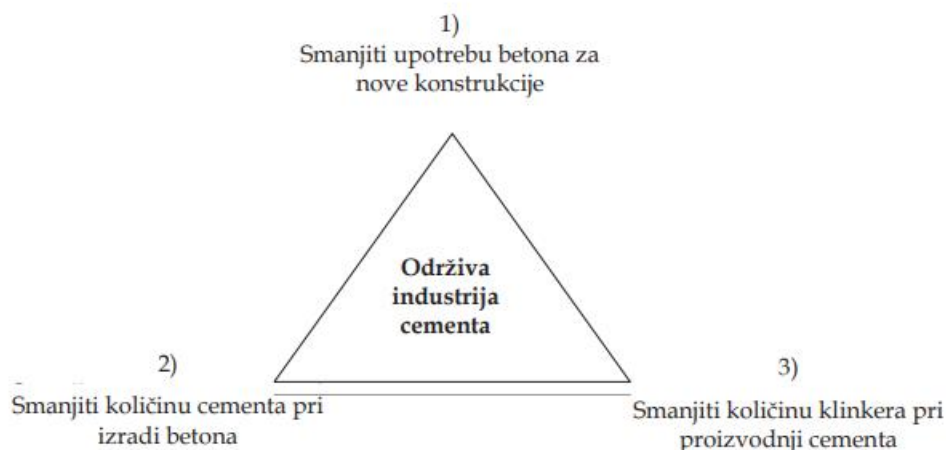
Nakon vode i agregata, beton je najviše upotrebljavan materijal. Portlandski cement koji je korišten kao vezivo u betonu emitira 1 kg stakleničkih plinova po kilogramu proizvedenog betona. Poboljšanjem učinkovitosti izgaranja i operativnih procesa može se postići značajno smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Drugi način smanjenja emisije CO<sub>2</sub> i potrošnje energije u proizvodnji cementa je upotreba otpadnih guma, ostataka drveta i otpada od petrolejskih proizvoda kao goriva u rotacijskim pećima. [16]



Slika 10 Životni ciklus betona [16]

Utjecaj korištenja betona na okoliš promatra se u svim fazama. Proizvodnju agregata karakterizira potrošnja prirodnih resursa, mala količina energije i otpad u obliku prašine i vode. Kod proizvodnje cementa imamo veliku emisiju CO<sub>2</sub> i veliki utrošak energije, dok je za vodu kao sastojak betona utjecaj suprotan. Za samu se proizvodnju betona troši energija za miješanje i transport. Za vrijeme građenja, CO<sub>2</sub> se emitira za vrijeme transporta, te završne obrade betona. Važno je uzeti u obzir korištenje oplata i nastanak otpada. [16]

Mjere koje mogu smanjiti emisije CO<sub>2</sub> u proizvodnji cementa su smanjenje upotrebe betona pri gradnji novih konstrukcija, smanjenje količine cementa kod izrade betona te smanjenje količine klinkera pri izradi cementa. Do 2030. planira se smanjenje ukupne emisije CO<sub>2</sub> od proizvodnje klinkera s 2070 na 940 milijuna tona CO<sub>2</sub>. [16]



Slika 11 Mogućnosti smanjenja emisije CO<sub>2</sub> u industriji cementa [16]

Istraživanja se bave mogućnošću "zarobljavanja" CO<sub>2</sub> u betonu. Materijali na bazi cementa, uključujući beton, apsorbiraju CO<sub>2</sub> tijekom procesa karbonatizacije. Karbonatizacija betona je proces u kojem ugljični dioksid iz zraka prodire u beton i reagira s kalcijevim hidroksidom, stvarajući kalcijev karbonat. Ovaj proces je vrlo spor, oko 1 mm godišnje, i ovisi o vrsti cementa, kvaliteti betona i uvjetima okoliša. Iako karbonatizacija smanjuje pH betona i može uzrokovati koroziju armature, proučava se kao opcija za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Procjenjuje se da oko 19% CO<sub>2</sub> proizvedenog pri izradi cementa može biti reapsorbirano tijekom životnog vijeka betonske konstrukcije. [16]

### 3.5.2. Održivost drva u graditeljstvu

U usporedbi s drugim vrstama građevinskog materijala, drvo je održiv materijal koji je obnovljiv, lako dostupan i povoljne cijene. Poznato je da se drvo formira kroz proces fotosinteze, pri čemu apsorbira ugljični dioksid iz okoliša i ispušta kisik. Zbog pretjeranog iskorištavanja šuma, postoji velika potreba za pošumljavanjem. Energija utrošena za korištenje drva kao građevinskog materijala varira, ovisno o mogućnosti daljnje upotrebe drva nakon njegovog korištenja u konstrukcijama, primjerice za grijanje. Emisija stakleničkih plinova može varirati od 0 do 64 kg po m<sup>3</sup>. Proces raspadanja drveta vraća CO<sub>2</sub> u atmosferu, koji se ponovo apsorbira u okolnu vegetaciju. Rezanjem zrelog drveta omogućava se bolji rast novih stabala, što rezultira većom apsorpcijom stakleničkih plinova nego kod starijih stabala. Pošumljavanje zemljišta također doprinosi smanjenju erozije tla i otjecanja kišnice. [16]

### 3.5.3. Održivost čelika u graditeljstvu

Pri proizvodnji čelika emisija stakleničkih plinova iznosi 0,91 kg po kilogramu proizvedenog čelika, što predstavlja značajan nedostatak u usporedbi s ostalim vrstama građevinskog materijala. Ovaj podatak temelji se na upotrebi 35% recikliranog materijala, koja rezultira smanjenjem potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova. Prema nekim izvorima, industrija čelika reciklira veće količine materijala nego što je to slučaj u industrijama koje se bave aluminijem, staklom i drvom. [16]

Smanjenje emisije CO<sub>2</sub> moguće je postići korištenjem otpadnih materijala. Procijenjeno je da u Republici Hrvatskoj količina građevnog otpada iznosi 2,5 milijuna tona godišnje od čega stupanj reciklaže i dalje ne prelazi 7%. Sirovinu dobivenu recikliranjem građevinskog otpada možemo ponovno koristiti kao materijal za nosive slojeve cesta, putova i parkirališta; dodatak za razne vrste betona, asfalt betonske mješavine i kao materijal za izradu betonskih elemenata. [16]

Kako bi se izbjegao nastanak otpada i povećao postotak reciklaže, potrebno je učiniti sljedeće mjere po fazama gradnje:

U fazi planiranja potrebno je:

- projektirati dugovječnije građevine
- razmatrati cijeli životni ciklus korištenih materijala
- omogućiti lako odvajanje dijelova građevine s kraćim vijekom trajanja
- izrađivati projekte rušenja

Kod planiranja gradilišta:

- koordinirati sve tvrtke koje sudjeluju u izgradnji
- organizirati odvajanje materijala na gradilištu
- dogovoriti uporabu materijala koji omogućuju ponovno korištenje

Prilikom odabira građevinskih materijala potrebno je:

- voditi račun o ekonomičnosti i ponovnoj uporabi istih
- u što manjoj mjeri koristiti materijale koji su mješavina organskih i anorganskih materijala
- što manje koristiti kompozitne materijale
- koristiti reciklirani materijal [16]

## 4. FIZIKA ZGRADE

### 4.1. Općenito o građevini

Ovim diplomskim radom izvršen je proračun toplinske izolacije cjelokupnog prostora nestambene zgrade muzeja koja se nalazi u gradu Zagrebu. Glavna građevna jedinica ove zgrade je puna opeka. Gabariti zgrade su 33,66 x 26,07 m, a površina iznosi 2698,18 m<sup>2</sup>.

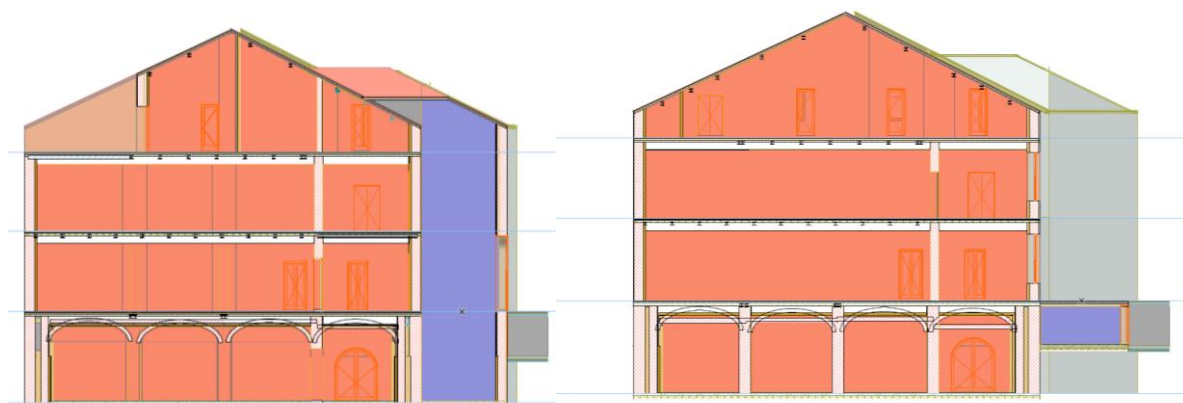
Predmetna zgrada nema status pojedinačnog kulturnog dobra, ali čini dio kulturno-povijesne cjeline Grada Zagreba. Zbog toga svi zahvati, koji uključuju konstruktivnu pa tako i energetska obnovu, moraju biti u skladu s preporukama konzervatorske struke i Ministarstva kulture.

Cilj je ovih mjera zadovoljavanje zahtjeva za zgrade gotovo nulte energije propisane važećim TPRUETZZ.

Zgrada muzeja definirana je kao jedna zona za proračun energetske svojstava zgrade. Zona se dijeli na grijani i negrijani prostor. Podjela je prikazana na slikama niže. Crvena boja označuje grijani, dok plava označuje negrijani prostor.

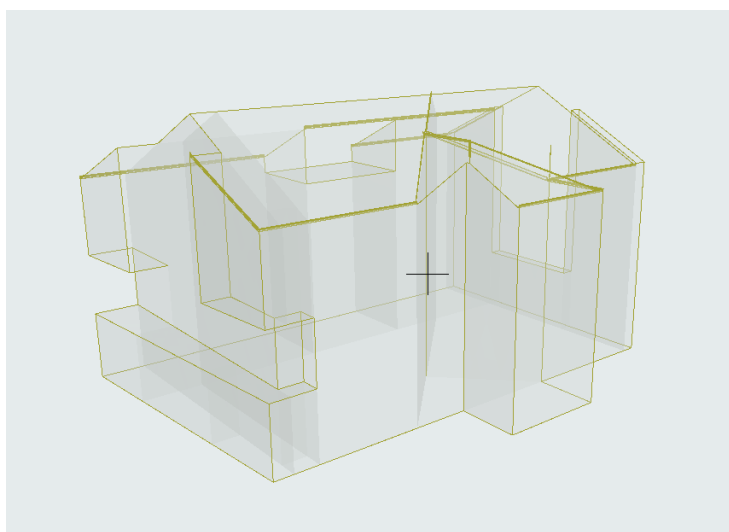


Slika 12 Tlocrt podruma (lijevo) i prizemlja (desno) s označenim grijanim i negrijanim prostorima



Slika 13 Presjeci zgrade s označenim grijanim i negrijanim prostorima

Negrijani prostor čini dizalo i garaža, dok je ostatak zgrade grijan. U računalnom programu Archicad izmodeliran je bruto volumen grijanog dijela zgrade.



Slika 14 Model bruto volumena grijanog dijela zgrade



## 4.2. Klimatski podaci

Veliki utjecaj na toplinske gubitke ili dobitke imaju temperatura zraka, relativna vlažnost, izloženost Sunčevu zračenju i brzina vjetra. Klimatski parametri određuju se obzirom na referentnu meteorološku postaju. Za proračun fizike muzeja odabrana je meteorološka postaja Zagreb Grič. Predmetna građevina se nalazi u 2. zoni globalnog Sunčevog zračenja sa srednjom mjesečnom temperaturom vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade  $\Theta_{e,mj,min} \leq 3 \text{ }^\circ\text{C}$  i unutarnjom temperaturom  $\Theta_i \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tablica 2 Klimatski podaci za referentnu postaju Zagreb Grič

Lokacija:

Referentna postaja:

Zagreb Grič

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
<b>Temperature zraka ( ° C)</b>													
m	2,2	4,3	8,3	12,9	17,6	20,9	22,7	22,3	17,2	12,4	7,5	2,5	12,6
min	-9,6	-7,8	-5,1	1,4	6,2	10,2	14,1	11	8,8	1,7	-3,8	-9,8	-9,8
max	14	14,8	18,9	21,7	27	29,1	30,7	29,9	26	21,2	20	14,8	30,7
<b>Tlak vodene pare (Pa)</b>													
m	520	570	670	840	1180	1500	1620	1640	1410	1080	780	590	1040
<b>Relativna vlažnost zraka (%)</b>													
m	76	67	62	60	62	64	63	65	71	76	78	81	69
<b>Brzina vjetra (m/s)</b>													
m	1,5	1,8	2,1	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7
<b>Broj dana grijanja</b>													
Temperatura vanjskog zraka											$\leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$	151,7	
											$\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$	172,8	
											$\leq 15 \text{ }^\circ\text{C}$	197,1	

## 4.3. Postojeće stanje građevine

Točno stanje zgrade nije moguće utvrditi samo iz dostupnih nacрта i fotografija. Kako bi znali točno stanje zgrade potrebno je provesti metode nerazornih ispitivanja.

Zidovi podruma izvedeni su kao dvostruki zidovi od kojih je unutarnji zid debljine 60 cm nosivi, a vanjski zid debljine 40 cm služio je kao zaštita od vode. Između dva sloja zida nalazi se sloj zraka debljine 25 cm. Nosivi zidovi prizemlja i ostalih katova izrađeni su od opeke debljine 50 cm. Pregradni zidovi napravljeni su od gipskartonskih ploča i ovčje vune ukupne debljine 15 cm. Stropne ploče su od armiranog betona debljine 16 cm poduprtog čeličnim HEA 180 profilima. Toplinska izolacija izvodi se kao unutarnja od ovčje vune, dok je u svrhu

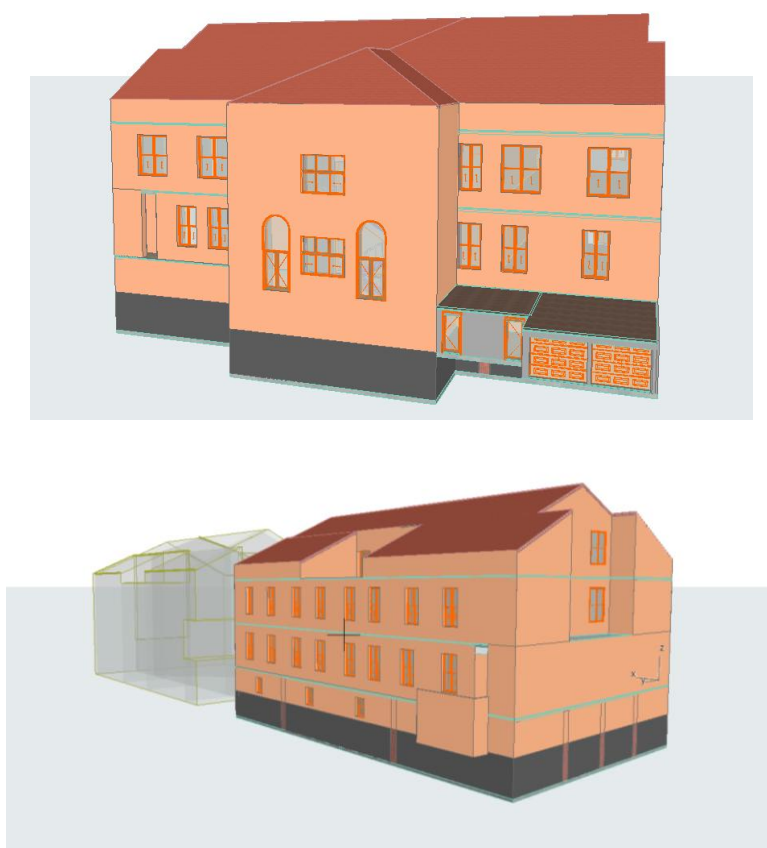
zvučne izolacije izveden spuštenu strop i plivajući pod. Prozori su PVC, s trostrukim izo staklom, dok su vrata također PVC.

Klimatski uvjeti za proračun preuzeti su s referentne postaje Zagreb Grič, gdje prosječna temperatura iznosi 12,6 °C, a prosječna brzina vjetra 1,7 m/s. Zgrada se sastoji od dvije toplinske zone: grijane i negrijane. Negrijanu zonu čine lift i garaža, dok ostatak prostora predstavlja grijanu zonu. Zgrada se klasificira kao nestambena s jednom grijanom zonom, a svi prostori osim lifta i garaže smatraju se grijanima.

Građevina se sastoji od podrumске etaže, prizemlja i dva kata. Maksimalna visina muzeja, mjerena od konačno poravnatog terena uz pročelje do gornjeg ruba krovne 15,33 m.

Projekt zgrade modeliran je u računalnom programu Archicad, a pomoću njega dobivene su karakteristike potrebne za daljnji proračun kao što su volumen grijanog dijela zgrade, oplošje grijanog dijela zgrade, površina korisne površine, površina kondicioniranje zone i ostalo.

Slike u nastavku prikazuju Archicad model muzeja u Zagrebu.



Slika 15 Prikaz 3D modela predmetne zgrade

Tablica 3 Geometrijske karakteristike zgrade dobivene iz 3D modela

Potrebni podaci	Zona 1
Oplošje grijanog dijela zgrade – $A$ [ $m^2$ ]	3500,68
Obujam grijanog dijela zgrade – $V_e$ [ $m^3$ ]	11531,77
Obujam grijanog zraka – $V$ [ $m^3$ ]	8282,42
Faktor oblika zgrade - $f_o$ [ $m^{-1}$ ]	0,30
Ploština korisne površine grijanog dijela zgrade – $A_k$ [ $m^2$ ]	2211,87
Proračunska korisna površina grijanog dijela zgrade – $A_{k'}$ [ $m^2$ ]	2211,87
Ukupna ploština pročelja – $A_{uk}$ [ $m^2$ ]	2502,42
Ukupna ploština prozora – $A_{wuk}$ [ $m^2$ ]	193,80

#### 4.4. Građevni dijelovi

Zidovi na granici grijano – vani izrađeni su od opeke debljine 50 cm. Ugrađena je toplinska izolacija od ovčje vune debljine 10 cm s unutarnje strane koja je obložena s dva sloja gipskartonskih ploča. Kako ne bi došlo do kondenzacije, između vune i gipskartonskih ploča ugrađena je parna brana. Vanjska stana zida obložena je vapneno-cementnom žbukom, slojem polimer-cementnog ljepila s armaturnom mrežicom i završnim slojem silikatne žbuke.

Parametri izdvojeni u tablicama su:

- $d$  –debljina sloja [ $m$ ]
- $\rho$  –gustoća [ $kg/m^3$ ]
- $C$  –specifični toplinski kapacitet [ $J/kgK$ ]
- $\lambda$  –koeficijent toplinske provodljivosti
- $\mu$  –faktor otpora difuziji vodene pare [-]
- $S_d$  –debljina zračnog sloja ekvivalentna difuziji vodene pare [ $m$ ]

Tablica 4 Slojevi vanjskog zida

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
2	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
3	HOMESEAL LDS 5 parna kočnica	0,032	0,500	15625,00	5,00	375,00
4	Ovčja vuna	10,000	0,039	35,00	3,50	19,00
5	1.01 Puna opeka od gline	50,000	0,810	10,00	5,00	1800,00
6	3.03 Vapneno-cementna žbuka	3,000	1,000	20,00	0,60	1800,00
7	Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,300	0,900	14,00	0,04	1650,00
8	RÖFIX Silikatputz Silikatna završna žbuka	0,200	0,700	40,00	0,08	1800,00
Definirane ploštine [m <sup>2</sup> ]:				Istok	377,79	
				Sjever	291,02	
				Zapad	335,46	
				Jug	289,15	

Zgrada ima toplinske gubitke i prema negrijanim prostorijama. Kod tih je zidova korištena toplinska izolacija debljine 8 cm.

Tablica 5 Slojevi zida prema negrijanim prostorijama

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
2	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
3	HOMESEAL LDS 5 parna kočnica	0,032	0,500	15625,00	5,00	375,00
4	Ovčja vuna	8,000	0,039	35,00	2,80	19,00
5	Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,300	0,900	14,00	0,04	1650,00
6	1.01 Puna opeka od gline	50,000	0,810	10,00	5,00	1800,00
7	3.03 Vapneno-cementna žbuka	3,000	1,000	20,00	0,60	1800,00
8	Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,300	0,900	14,00	0,04	1650,00
9	RÖFIX Silikatputz Silikatna završna žbuka	0,200	0,700	40,00	0,08	1800,00
Definirana ploština [m <sup>2</sup> ]:					160,20	

Pregradni zidovi izrađeni su od ovčje vune koja se nalazi između gipskartonskih ploča. Slojevi su prikazani u tablici.

Tablica 6 Slojevi pregradnih zidova

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
2	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
3	Ovčja vuna	10,000	0,039	35,00	3,50	19,00
4	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
5	4.01 Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	0,10	900,00
Definirana ploština [m <sup>2</sup> ]:					1426,05	

Zidovi prema tlu izrađeni su od dva sloja opeke. Unutarnji sloj, nosivi, ima debljinu od 60 cm, dok vanjski sloj debljine 40 cm služi kao hidroizolacija. Između ova dva sloja smještena je toplinska izolacija od granula ekspaniranog polistirena debljine 25 cm. S unutarnje strane zida postavljen je hidroizolacijski sustav s negativne strane.



Slika 16 Sustav za brtvljenje podruma iznutra u slučaju vlage iz tla [15]

Nosivu međukatnu konstrukciju čini armirano-betonska podna ploča koja leži na čeličnim gredama. Kao zaštita od zvuka izveden je plivajući pod i spuštenu strop unutar kojeg se nalaze sve instalacije i ventilacija.

Tablica 7 Slojevi poda na tlu

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.06 Drvo - tvrdo - bjelogorica	1,300	0,180	200,00	2,60	700,00
2	3.19 Cementni estrih	5,000	1,600	50,00	2,50	2000,00
3	Polietilenska folija 0,15 mm	0,015	0,500	334000,00	15,00	980,00
4	Knauf Insulation podna ploča NaturBoard TPT	3,000	0,036	1,10	0,03	130,00
5	FIBRANxps 300-L	16,000	0,035	200,00	32,00	35,00
6	Bitumenska ljepenka (traka)	0,320	0,230	50000,00	160,00	1100,00
7	2.01 Armirani beton	16,000	2,600	110,00	17,60	2500,00
Definirana ploština [m <sup>2</sup> ]:					719,45	

Kosi krov većinom se svoje površine nalazi na granici grijano - vani te tako čini ovojnicu grijanog dijela zgrade. Na granici negrijano-vani nalazi se samo krov iznad dizala. Toplinska izolacija krova sastoji se od tri sloja mineralne vune, dok pokrov čini crijep.

Tablica 8 Slojevi kosog krova

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.01 Gipskartonske ploče	25,000	0,250	8,00	2,00	900,00
2	Knauf Insulation filc za kose krovove UNIFIT 035	8,000	0,035	1,10	0,09	20,00
3	HOMESEAL LDS 35 parna brana	0,017	0,500	205000,00	17,00	520,00
4	Heterogeni sloj	14,000	0,000	0,00	0,00	0,00
5	Knauf Insulation ploča za kose krovove TERMOTOP	8,000	0,040	1,10	0,09	150,00
6	HOMESEAL LDS 0,04 FixPlus paropropusna-vodonepropusna folija s ljepljivom trakom	0,053	0,200	37,00	0,02	280,00
7	Dobro provjetravan sloj zraka	5,000	-	1,00	0,01	-
8	Crijep (krovni) glina	1,500	1,000	40,00	0,60	2000,00
Definirane ploštine [m <sup>2</sup> ]:				Istok	326,26	
				Sjever	18,43	
				Zapad	378,35	
				Jug	28,68	

Kao obloga ravnog krova korišten je ekstrudirani polistiren u padu od 2% na kojem se nalazi sloj bitumenske ljepenke, a potom slijedi još jedan sloj ekstrudiranog polistirena debljine 5 cm prekriven membranom koja pospješuje odvodnju s ravnog krova. Na distancerima nalazi se obloga od betonskih podnih ploča.

Tablica 9 Slojevi ravnog krova

R.b.	Materijal	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4.01 Gipskartonske ploče	2,500	0,250	8,00	0,20	900,00
2	Ovčja vuna	10,000	0,039	35,00	3,50	19,00
3	Neprovjetravan sloj zraka	35,000	-	1,00	0,01	-
4	2.01 Armirani beton	16,000	2,600	110,00	17,60	2500,00
5	FIBRANxps 2%incline	5,600	0,035	200,00	11,20	35,00
6	5.02 Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,400	0,230	50000,00	200,00	1100,00
7	FIBRANxps 300-L	5,000	0,035	200,00	10,00	35,00
8	FIBRANskin SEAL	0,002	0,500	57,00	0,00	500,00
9	Neprovjetravan sloj zraka	0,500	-	1,00	0,01	-
10	Betonske ploče	3,800	2,000	100,00	3,80	2400,00
Definirana ploština [m <sup>2</sup> ]:						134,87

Tablica 10 Proračun građevinskih dijelova zgrade

Naziv građevnog dijela	A [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> K]	U <sub>max</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	OK
Zid GV	1293,42	0,29	0,30	✓
Zid NV	128,61	0,29	0,30	✓
Zid GN	160,20	0,33	0,40	✓
Zid GG	1426,05	0,33	0,60	✓
Zid GV prema tlu	253,22	0,23	0,40	✓
Medukatna konstrukcija	1875,80	0,24	0,60	✓
Pod prema tlu	719,45	0,17	0,40	✓
Krov	751,72	0,11	0,25	✓
PP GV	134,87	0,13	0,25	✓

U tablici su izdvojene sve vrijednosti toplinskih koeficijenata i uspoređene s maksimalnim vrijednostima. Vidljivo je da su svi građevni dijelovi zadovoljili.

#### 4.5. Karakteristike otvora

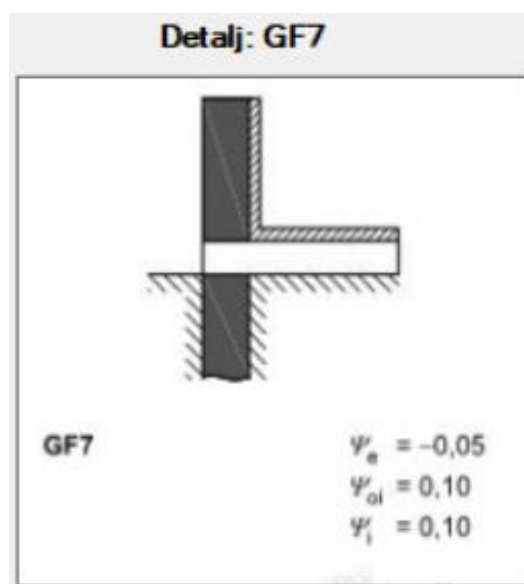
Postojeći su prozori bili drveni sa jednostrukim ostakljenjem, budući da predmetna zgrada ima status kulturno-povijesne cjeline, postojeće prozore možemo zamijeniti novim prozorima. Ugrađeni su PVC prozori s trostrukim izo-staklom na svim stranama zgrade. Prozori su različitih dimenzija i nalaze se na svim stranama vanjske ovojnice zgrade. Prozori nemaju nikakvu zaštitu od sunca. Sva su vrata neprozirna i također izrađena od PVC -a. Zbog osiguranja zrakonepropusnosti, koristit će se RAL ugradnja prozora.

Tablica 11 Popis ugrađenih otvora sa pripadajućim U-vrijednostima

Naziv otvora	Uw [W/m <sup>2</sup> K]	Orientacija	Aw [m <sup>2</sup> ]	n
1.35X2.5	0,68	Istok	3,38	8,00
	0,68	Zapad	3,38	7,00
1.05X1.45	0,68	Istok	1,52	3,00
1.25X2.5	0,68	Zapad	3,13	1,00
1.28X2.5	0,68	Istok	3,20	8,00
1.9X1.45	0,68	Istok	2,76	1,00
1.9X2.4	0,68	Siever	4,56	2,00
	0,68	Jug	4,56	2,00
1.9X2.5	0,68	Siever	4,75	4,00
	0,68	Jug	4,75	4,00
Ulazna vrata GV	0,67	Zapad	6,00	1,00
Ulazna vrata NV dizalo	0,87	Zapad	6,00	1,00
Balkonska vrata 1.82X2.4	0,67	Istok	4,38	2,00
2.05X2.5	0,68	Zapad	5,13	4,00
2.4X2.0	0,68	Zapad	4,80	2,00
Ulazna vrata NV	0,87	Zapad	1,89	2,00

#### 4.6. Toplinski gubici i dobici

Toplinski gubitci većinom se ostvaruju preko vanjske ovojnice zgrade, no ne smiju se zanemariti gubitci kroz toplinske mostove i otvore građevine. U računalnom programu Kl Expert odabran je paušalni dodatak na koeficijent prolaska topline od 0,10 W/(m<sup>2</sup>K) budući da se radi o staroj zgradi s unutarnjom izolacijom u kojoj je teško u potpunosti riješiti toplinske mostove. Detalj GF7 odabran je za pod na tlu.



Slika 17 Detalj toplinskog mosta za pod prema tlu [21]



Toplinski gubitci ostvaruju se i prema negrijanim prostorijama. Kondicionirana zona graniči s negrijanim dizalom i negrijanom garažom.

Unutarnji su toplinski dobitci izračunati prema normi EN 13790. Solarni dobitci uzeti su za sve otvore na vanjskoj ovojnici zgrade, dok solarnih dobitaka prema preko staklenika za predmetnu zgradu nema.

Tablica 12 Ukupni koeficijenti transmisivskih gubitaka

Ukupni koeficijenti transmisivskih gubitaka	
Koeficijent transmisivske izmjene topline prema vanjskom okolišu, $H_D$ [W/K]	811,418
Uprosječni koeficijent transmisivske izmjene topline prema tlu, $H_{g,avg}$ [W/K]	157,437
Koeficijent transmisivske izmjene topline kroz negrijani prostor, $H_U$ [W/K]	39,762
Koeficijent transmisivske izmjene topline prema susjednoj zgradi, $H_A$ [W/K]	0,000
<b>Ukupni koeficijent transmisivske izmjene topline, <math>H_{Tr}</math> [W/K]</b>	<b>1008,617</b>

Ukupni koeficijent transmisivskih gubitaka dobiva se prema:

$$H_{Tr} = H_D + H_{g,avg} + H_U + H_A$$

Gdje su:

- $H_D$  Koeficijent transmisivske izmjene topline prema vanjskom okolišu [W/K]
- $H_{g,avg}$  Prosječni koeficijent transmisivske izmjene topline prema tlu [W/K]
- $H_U$  Koeficijent transmisivske izmjene topline prema negrijanom prostoru [W/K]
- $H_A$  Koeficijent transmisivske izmjene topline prema susjednoj zgradi [W/K] [21]

Tablica 13 Ukupni dobitci topline

Ukupni dobitci topline	
Unutarnji dobitci topline	$Q_{int} = 96.879,91$ [kWh]
Solarni dobitci topline	$Q_{sol} = 56.315,03$ [kWh]

Ukupni unutarnji dobitci topline iznose 96 879,91 [kWh], dok solarni dobitci iznose 56 315,03 [kWh].

#### 4.7. Podaci o termotehničkom sustavu i rasvjeti

Prema tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije, termotehnički sustav čini oprema za grijanje, hlađenje, ventilaciju, klimatizaciju i pripremu potrošne tople vode. Da bi se ispunili zahtjevi za racionalnu uporabu energije u termotehničkom sustavu zgrade, sustav grijanja mora biti projektiran i izveden na način koji uključuje energetski učinkovito postrojenje za proizvodnju topline, toplinski izolirane cijevi u skladu s važećim propisima, nisku projektnu temperaturu medija za grijanje te usklađenu regulaciju unutarnje temperature u zgradi ili njenom grijanom dijelu. Sve to treba biti usklađeno s tehnološkim razvojem i stručnim standardima koji su na snazi u trenutku izrade projekta. [9] Sustav grijanja, hlađenja I PTV – a je centralno grijanje na električnu energiju. Ugrađena je mehanička ventilacija s rekuperacijom topline. Odabrana shema ventilacijskog sustava je Shema 2 koja predstavlja Dovod i odvod zraka s rekuperacijom topline i bez toplinske pripreme.

Tablica 14 Rezultat proračuna termotehničkog sustava grijanja

Rezultati proračuna		
Termotehnički sustav	Termotehnički sustav (#1)	
Vrsta sustava	Grijanje	
Naziv energenta primarne energije	Električna energija	
Potrebna energija za grijanje	$Q_{H,nd}$ [kWh]	38016,34
Faktor pretvorbe	$f$ [-]	0,30
Konačna energija za grijanje	$Q_{H,gen,in}$ [kWh]	11404,90

Tablica 15 Rezultat proračuna termotehničkog sustava pripreme PTV

Rezultati proračuna		
Termotehnički sustav	Termotehnički sustav (#1)	
Vrsta sustava	PTV	
Naziv energenta primarne energije	Električna energija	
Potrebna energija za pripremu PTV	$Q_{W,nd}$ [kWh]	27648,37
Faktor pretvorbe	$f$ [-]	0,30
Konačna energija za pripremu PTV	$Q_{W,gen,in}$ [kWh]	8294,51

Tablica 16 Rezultat proračuna termotehničkog sustava hlađenja

Rezultati proračuna		
Termotehnički sustav	Termotehnički sustav (#1)	
Vrsta sustava	Hlađenje	
Naziv energenta primarne energije	Električna energija	
Potrebna energija za hlađenje	Q <sub>C,nd</sub> [kWh]	47428,30
Faktor pretvorbe	f [-]	0,45
Konačna energija za hlađenje	Q <sub>C,gen,in</sub> [kWh]	21342,73

Za proračun konačne energije potrebno je u obzir uzeti i korišteni sustav rasvjete. Odabrana je LED rasvjeta koja pomaže minimizirati potrošnju energije dok se ostvaruju optimalni uvjeti osvjetljenja za muzejske izložke. Za proračun je uzeta vrijednost osvjetljenja 300 (lum/m<sup>2</sup>) i vrijednost žarulje od 100 lum/W, što daje snagu žarulje 3 W/m<sup>2</sup>. Snaga žarulje pomnožena sa korisnom površinom daje vrijednost rasvjete P<sub>n,spec</sub> od 6635,61 W.

Tablica 17 Rezultat proračuna potrebne energije za rasvjetu

Rezultati proračuna		
Električna energija potrebna za rasvjetu	E <sub>L</sub> [kWh]	24016,25
Faktor primarne energije	f <sub>p</sub> [-]	1,6140
Primarna energija potrebna za rasvjetu	E <sub>prim,L</sub> [kWh]	38762,23


Ugrađeni su fotonaponski sustavi ukupne površine 80 m<sup>2</sup> s istočnom i zapadnom orijentacijom crvene boje kako se ne bi narušila vizura grada Zagreba. Kod proračuna primarne i konačne energije korišten je približni proračun strojarskih sustava. Za termodinamičke sustave grijanja i sustava potrošne tople vode faktor pretvorbe energije u konačnu energiju iznosi 0,3, a faktor pretvorbe za sustave hlađenja uzet je kao 0,45.

Tablica 18 Rezultat proračuna proizvedene energije u fotonaponskom sustavu 1

Osnovni podaci		
Naziv	Fotonaponski sustav 1	
Ulazni podaci proračuna		
Ukupna efektivna površina PV modula (bez okvira)	A [m <sup>2</sup> ]	40,00
Vrsta PV modula	Mono-kristalini Silicij	
Način ugradnje PV modula	Intenzivno ili prisilno ventilirani moduli	
Informativna vrijednost gornje granice koeficijenta vršne snage	K <sub>pk,gg</sub> [-]	0,180
Informativna vrijednost donje granice koeficijenta vršne snage	K <sub>pk,dg</sub> [-]	0,120
Koeficijent vršne snage za odabranu vrstu PV modula	K <sub>pk</sub> [-]	0,180
Vršna električna snaga PV sustava pri referentnom sunčevom zračenju	P <sub>pk</sub> [kW]	7,20
Faktor primarne energije za obnovljive izvore energije	f <sub>p,ole</sub> [-]	0,00
Godišnje vrijednosti sunčevog ozračenja horizontalne plohe	E <sub>sol,hor</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]	1253,00
Kut nagiba PV modula	[°]	30
Orijentacija PV modula	Istok	
Faktor nagiba u ovisnosti o nagibu i orijentaciji PV modula	f <sub>tilt</sub> [-]	0,93
Sunčevo zračenje na plohu PV modula	I <sub>ref</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	1,00
Rezultati proračuna		
Godišnje sunčevo ozračenje PV sustava na plohu PV modula	E <sub>sol</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]	1165,29
Električna energija proizvedena u fotonaponskom (PV) sustavu	E <sub>el,pv,out</sub> [kWh/a]	6712,07

Tablica 19 Rezultat proračuna proizvedene energije u fotonaponskom sustavu 2

Osnovni podaci		
Naziv	Fotonaponski sustav 2	
Ulazni podaci proračuna		
Ukupna efektivna površina PV modula (bez okvira)	A [m <sup>2</sup> ]	40,00
Vrsta PV modula	Mono-kristalini Silicij	
Način ugradnje PV modula	Intenzivno ili prisilno ventilirani moduli	
Informativna vrijednost gornje granice koeficijenta vršne snage	K <sub>pk,gg</sub> [-]	0,180
Informativna vrijednost donje granice koeficijenta vršne snage	K <sub>pk,dg</sub> [-]	0,120
Koeficijent vršne snage za odabranu vrstu PV modula	K <sub>pk</sub> [-]	0,180
Vršna električna snaga PV sustava pri referentnom sunčevom zračenju	P <sub>pk</sub> [kW]	7,20
Faktor primarne energije za obnovljive izvore energije	f <sub>p,ole</sub> [-]	0,00
Godišnje vrijednosti sunčevog ozračenja horizontalne plohe	E <sub>sol,hor</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]	1253,00
Kut nagiba PV modula	[°]	30
Orijentacija PV modula	Zapad	
Faktor nagiba u ovisnosti o nagibu i orijentaciji PV modula	f <sub>tilt</sub> [-]	0,93
Sunčevo zračenje na plohu PV modula	I <sub>ref</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	1,00
Rezultati proračuna		
Godišnje sunčevo ozračenje PV sustava na plohu PV modula	E <sub>sol</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]	1165,29
Električna energija proizvedena u fotonaponskom (PV) sustavu	E <sub>el,pv,out</sub> [kWh/a]	6712,07

ENERGETSKI RAZREDI ZGRADE	Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}^-$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Specifična godišnja primarna energija $E_{prim}$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]
 <p>A+ A B C D E F G</p>	A 19,90	A+ 19,06
Upisati „nZEB“ ako zgrada zadovoljava zahtjeve za zgrade gotovo nulte energije propisane važećim TPRUETZZ <sup>1</sup>	nZEB	

Slika 18 Isječak iz energetske certifikata zgrade

Nakon svih prethodno navedenih mjera energetske obnove, rezultat proračuna je pokazao da 32,71 % godišnje isporučene energije za ta tehničkih sustava u zgradi je podmireno iz obnovljivih izvora energije. Dakle, predmetna zgrada je zadovoljila zahtjeve za zgrade gotovo nulte energije.

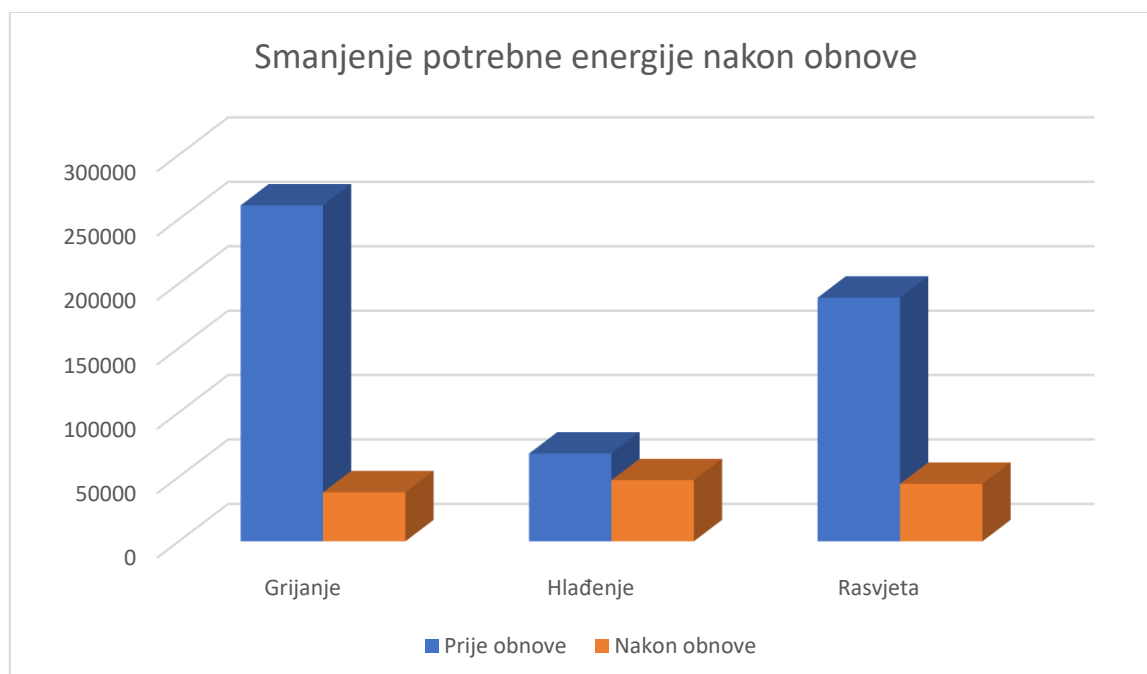
#### 4.8. Rezultati uštede nakon obnove

Projekt energetske obnove doveo je zgradu do razine zgrade gotovo nulte energije uz poštivanje konzervatorskih ograničenja. Uštede energije ostvarene su dodavanjem toplinske izolacije s unutarnje strane, zamjenom postojećih prozora s PVC prozorima s trostrukim izo stalkom koristeći RAL ugradnju, ugradnjom foto napona, LED rasvjete itd.

Godišnja potreba energije za grijanje smanjena je s 260 759,54 kWh na 38 016,34 kWh što čini uštedu od 85,42%. Energija potrebna za hlađenje smanjena je s 68 084,24 na 47 428,30 kWh pri čemu je ostvarena ušteda od 30,33 %. Ugradnja LED rasvjete smanjila je potrebnu energiju za rasvjetu s 187 695,85 na 24 016,25 kWh što čini uštedu od čak 87,20%.

Značajne promjene vidljive su kod primarne energije, koja je smanjena 428 417,60 kWh na 44 575,46 kWh što čini uštedu od 89,59 %.

Ovi rezultati pokazuju izuzetno uspješne mjere energetske učinkovitosti. Osim ekonomskih koristi, ove mjere pridonose i očuvanju okoliša čime se ostvaruju dugoročni pozitivni efekti.



Slika 19 Usporedba potrebne energije prije i nakon obnove

## 5. PRORAČUN TOPLINSKIH MOSTOVA

Da bi se smanjili toplinski gubitci, potrebno je dobro riješiti toplinske mostove. U ovom radu odabrano je i riješeno pet linijskih toplinskih mostova. Proračun toplinskih mostova proveden je pomoću računalnog programa "CRORAL" koji omogućuje uvoz AutoCAD detalja toplinskih mostova u obliku .dxf datoteka. Nakon uvoza potrebno je definirati karakteristike materijala od kojih su najvažniji toplinska provodljivost i koeficijent otpora difuziji vodene pare. Definiraju se i granični uvjeti. U ovom su slučaju kao granični temperaturni uvjeti uzeti temperatura od 0 °C za vanjski okoliš i 20° C za unutarnji prostor. Za temperaturu tla zadana je temperatura od 5 °C.

Rezultati proračuna daju nam raspored temperaturnih krivulja kroz presjek toplinskih mostova, minimalne temperature na vanjskoj i unutarnjoj površini, koeficijent prolaska topline i koeficijent  $L_2D$  (W/mK) koji se koristi za proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline  $\psi$  (W/mK). Minimalna temperatura na površini zida je važan podatak zbog mogućnosti kondenzacije vodene pare. Kritična kombinacija minimalne temperature i relativne vlažnosti zraka dovodi do nastajanja kondenzata. Ovu kritičnu kombinaciju nazivamo i točka rošenja, a može se odrediti pomoću Mollierovog dijagrama. [18]

Duljinski se koeficijent prolaska topline označuje povećanje stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most u odnosu na područje koje nije poremećeno. [18]

Drugi je bitan parametar za procjenu pojave kondenzacije faktor temperature na površini, odnosno  $f_{Rsi}$ , a računamo ga prema sljedećem izrazu:

$$f_{Rsi} = \left( \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \right)$$

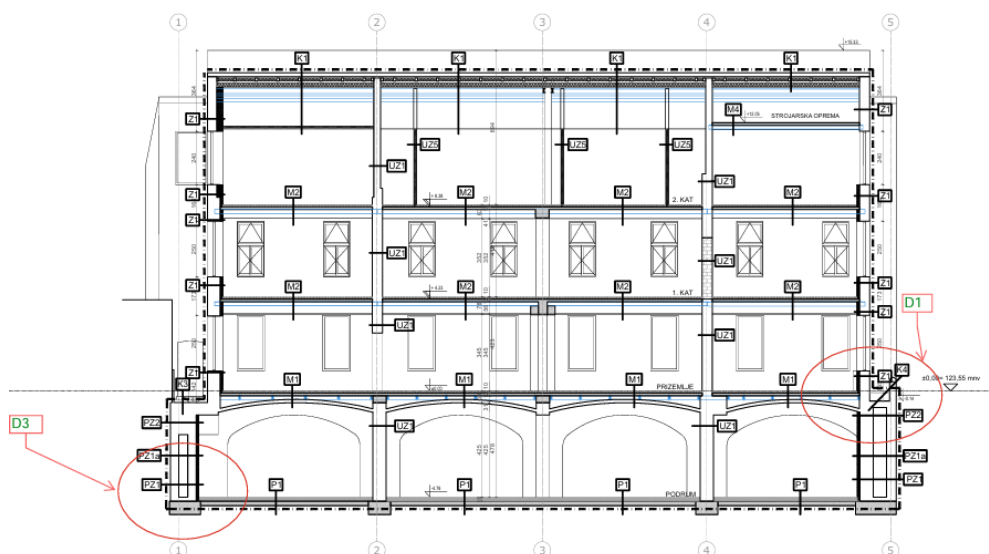
Gdje su:

- $\theta_{si}$  -temp. na unutrašnjoj površini elementa (°C)
- $\theta_i$  -unutrašnja temperatura zraka (°C)
- $\theta_e$  -vanjska temperatura zraka (°C)

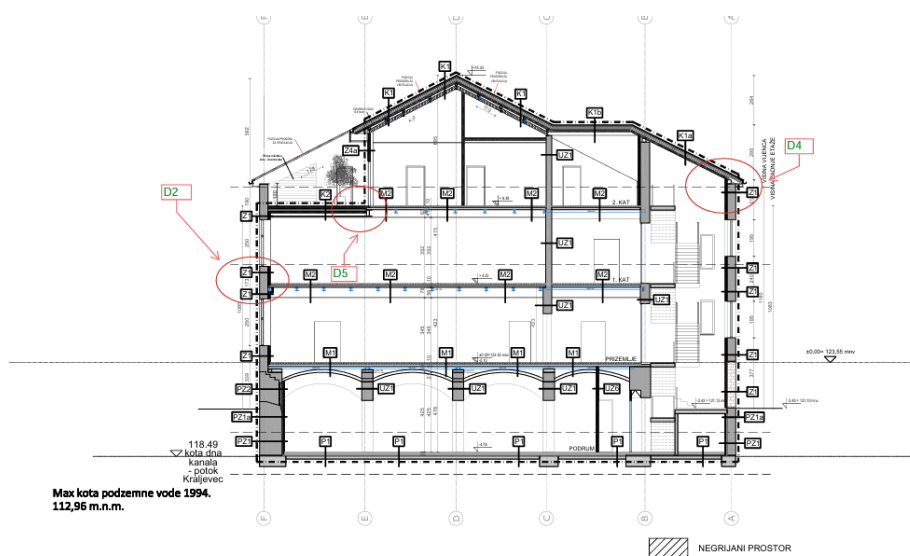
Ako faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 1, znači da je temperatura na unutarnjoj površini elementa ista kao temperatura unutarnjeg zraka, dakle nema kondenzacije. S druge strane, kada je  $f_{Rsi}$  0, temperatura na unutarnjoj površini je jednaka temperaturi zraka vanjskog okoliša. [18]

Analizirano je pet detalja na kojima postoji mogućnost kondenzacije, a prikazani su u nastavku.

1. D1 – spoj podrumsko zida, zida u podrumu i međukatne konstrukcije
2. D2 – spoj vanjskog zida i međukatne konstrukcije
3. D2 – detalj temelja
4. D4 – spoj kosog krova vanjskog zida
5. D5 – spoj ravnog krova i zida



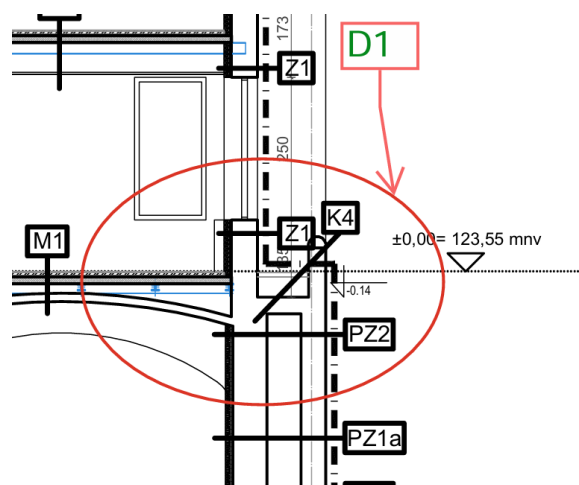
Slika 20 Uzdužni presjek građevine s prikazom detalja toplinskih mostova



Slika 21 Poprečni presjek zgrade s prikazom detalja toplinskih mostova

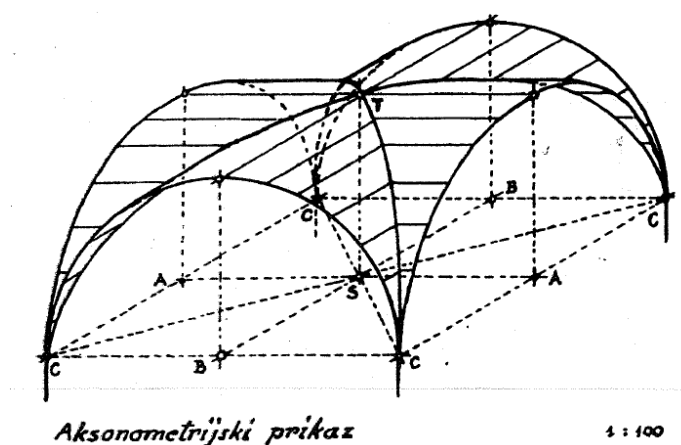


## 5.1. Detalj D1



Slika 22 Prikaz detalja D1 na presjeku zgrade

Detalj D1 predstavlja spoj zida u podrumu, zida prizemlja i međukatne konstrukcije. Podrumski zid napravljen je od dva sloja zidanog zida od pune opeke. Unutrašnji je zid debljine 60 cm te ima funkciju nosivosti. Vanjski zid debljine 40 cm ima funkciju takozvane hidroizolacije. Naime, funkcija vanjskog zida je zaštita od utjecaja vlage i vode, dok vanjski zid ostaje mokr, sloj zraka debljine 25 cm čini unutrašnji nosivi zid suhim. Međukatnu konstrukciju u podrumu činio je križni svod od opeke te drvena podna konstrukcija. Prostor između svoda i poda bio je zapunjen šutom.



Slika 23 Polukružni križni svod [22]

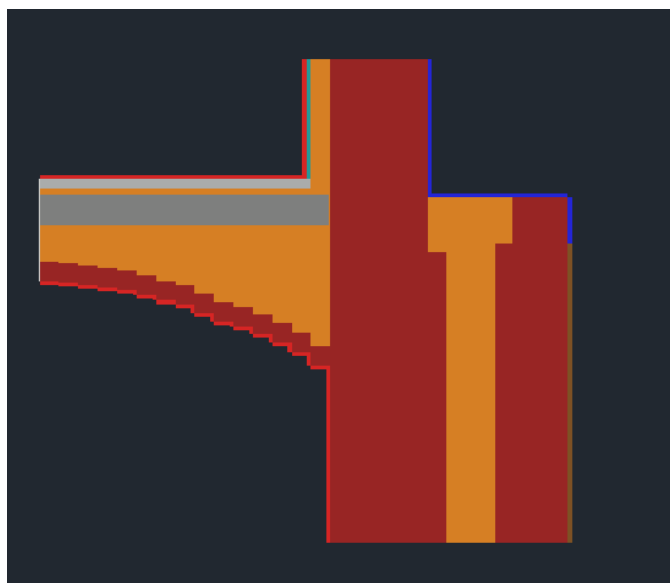
### 5.1.1. Detalj D1 – prvo rješenje

U prvom je slučaju odabrano rješenje u kojem se prostor između dva sloja zida ispunjava granulama ekspaniranog polistirena koje su međusobno vezane mineralnim ljepilom. Kao rješenje za hidroizolaciju zida, odabrano je rješenje za hidroizolaciju podruma iznutra u slučaju vlage iz tla .

Pod u podrumu čini AB ploča na koju se lijepi sloj bitumena, zatim se polaže XPS u debljini od 16 cm. Kao zaštita od udarnog zvuka, polaže se podna ploča od mineralne vune prije cementnog estriha i završne obloge od parketa.

Međukatnu konstrukciju čini podna ploča izrađena od armiranog betona debljine 16 cm koja naliježe na HEA čelične profile. Prostor između svoda i ploče ispunjen je također granulama ekspaniranog polistirena. Kao zaštita od udarnog zvuka izveden je plivajući pod. U debljini od 3 cm postavljena je ovčja vuna između AB ploče i cementnog estriha.

Za potrebe proračuna izrađen je pojednostavljeni nacrt detalja D1 te spremljen u .dxf obliku kako bi se mogao učitati u računalnom programu Cortal i provesti daljnji proračun.



Slika 24 Prikaz detalja D1 za potrebe proračuna sa slojevima materijala i rubnim uvjetima

Tablica 20 Karakteristike materijala

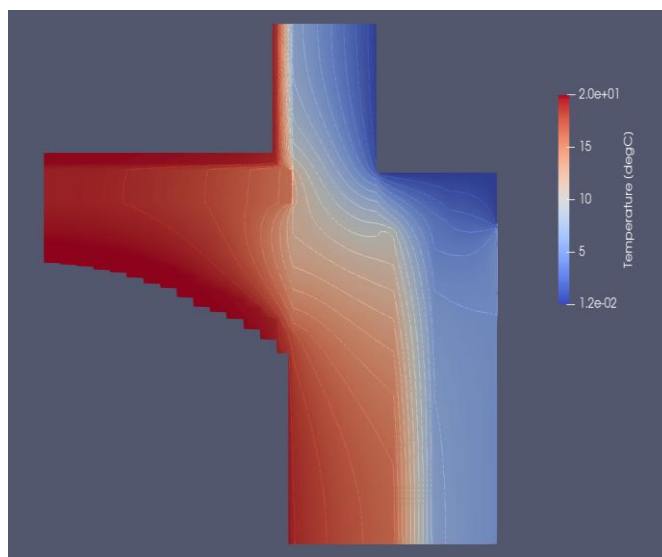
	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp[J/kgK]	$\mu$
	Opeka	0,48	910	850	8,00
	Toplinska izolacija	0,04	19	1700	1,00
	Armirani beton	2,60	2100	776	110,00
	Cementni estrih	1,60	1750	600	50,00
	Gipskartonske ploce	0,21	850	870	4,00

Tablica 21 Rubni uvjeti

	Granica	h [W/m <sup>2</sup> K]	T[°C]	RH [%]
	Interior	7,69	20,00	60,00
	Exterior	25,00	0,00	60,00
	Tlo	999999999,00	5,00	60,00

Tablica 22 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova – D1 prvo rješenje

	L <sub>2</sub> D [W/(mK)]		
Room	Grijani prostor	Vanjski prostor	Tlo
Grijani prostor	0,00000	0,23239	0,15231
Vanjski prostor	0,23239	0,00000	0,33136
Tlo	0,15110	0,23496	0,00000

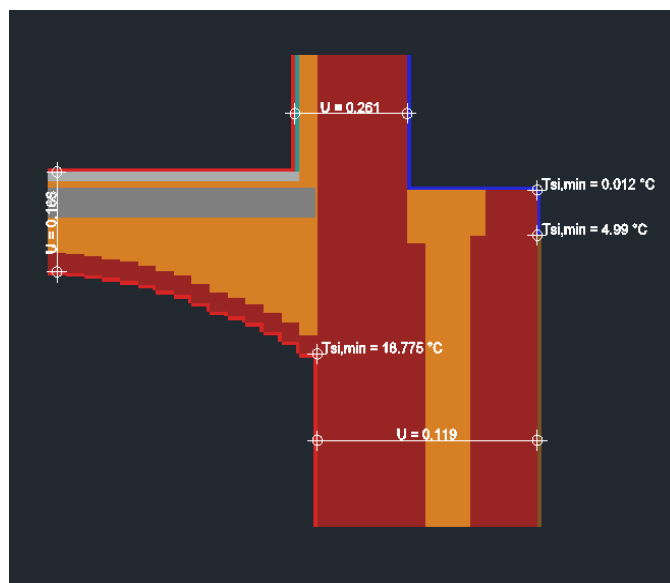


Slika 25 Temperaturni prikaz detalja D1

Tablica 23 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D1 prvi slučaj

Granica	Temp. zraka	Min. površinska temp.	Max. površinska temp.	RH [%]	$f_{Rsi}$
	[°C]	[°C]	[°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	18,685	19,986	92,150	0,934
Vanjski prostor	0,000	0,012	4,990	100,000	--
Tlo	5,000	4,990	5,000	99,930	0,998

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 18,685 °C, a faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,934 što nam govori da nema opasnosti od kondenzacije.



Slika 26 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini

CRORAL je pomoću ulaznih parametara izračunao minimalne temperature na površinama, U vrijednosti i linijske koeficijente prolaska topline.

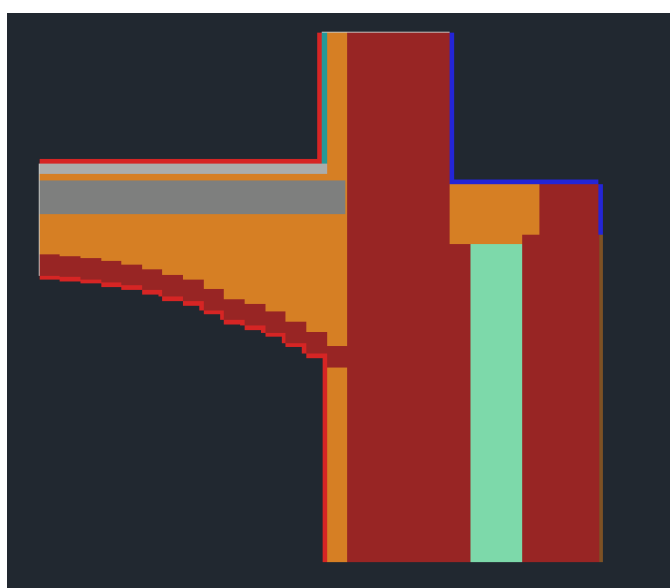
Tablica 24  $\Psi$  vrijednosti D1-prvi slučaj

Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/tlo	0,119	0,917	15,000	0,106
Grijano/Vani	0,261	0,620	20,000	0,162
		Grijano/tlo	$\Psi$ [W/(mK)]=	0,030
		Grijano/Vani	$\Psi$ [W/(mK)]=	0,248

### 5.1.2. Detalj D1 – drugo rješenje

Zbog sumnje u mogućnost vlaženja i kondenzacije na dodiru toplinske izolacije i opeke u ovom će se detalju predstaviti i usporediti drugo rješenje, a nakon proračuna kondenzacije vlage odabrat će se najoptimalnije.

U drugom je slučaju odabrano rješenje za međukatnu konstrukciju isto kao i u prvom slučaju. Kod podrumskog zida, umjesto rješenja sa granulama ekspaniranog polistirena odabrano je rješenje s unutarnjom izolacijom od ovčje vune u debljini od 10 cm. Vuna je obložena parnom branom i dva sloja gipskartonskih ploča kako bi se povećala izolacija zračnog zvuka.



Slika 27 Pojednostavljeni prikaz detalja D1 – drugi slučaj

Tablica 25 Karakteristike materijala

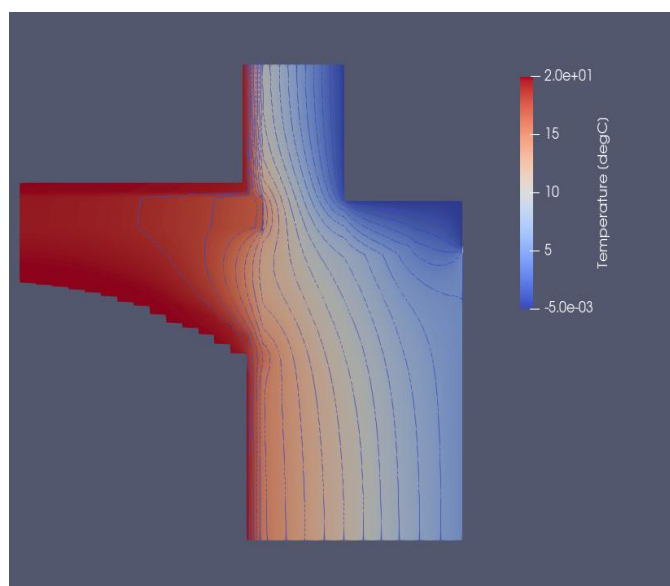
	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp[J/kgK]	$\mu$
	Opeka	0,48	910	850	8,00
	Toplinska izolacija	0,04	19	1700	1,00
	Zrak	0,18	1,00	1,00	1,00
	Armirani beton	2,60	2100	776	110,00
	Cementni estrih	1,60	1750	600	50,00
	Gipskartonske ploče	0,21	850	870	4,00

Tablica 26 Rubni uvjeti

Granica	$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	$T$ [°C]	RH [%]
Interior	7,69	20,00	60,00
Exterior	25,00	0,00	60,00
Tlo	99999999,00	5,00	60,00

Tablica 27 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova -D1 – drugo rješenje

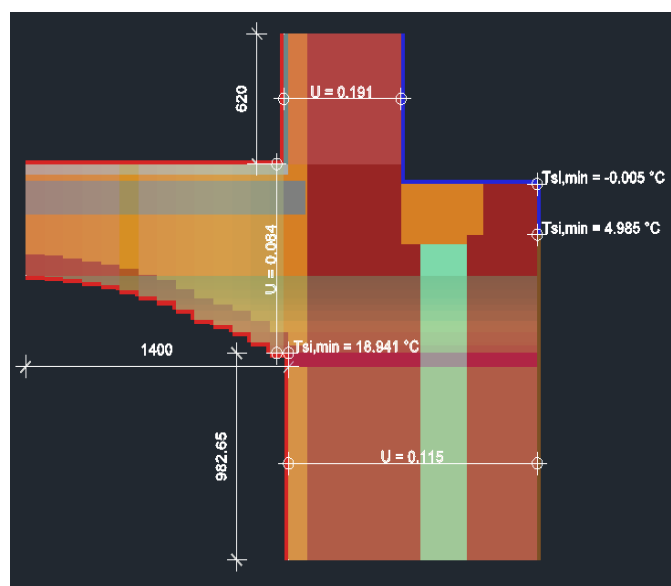
Room	$L_2D$ [W/(mK)]		
	Grijani prostor	Vanjski prostor	Tlo
Grijani prostor	0,00000	0,23239	0,15231
Vanjski prostor	0,23239	0,00000	0,33136
Tlo	0,15110	0,23496	0,00000



Slika 28 Temperaturni prikaz detalja D1 – drugi slučaj

Tablica 28 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D1-drugi slučaj

Granica	Temp. zraka	Min. površinska temp.	Max. površinska temp.	RH [%]	$f_{Rsi}$
	[°C]	[°C]	[°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	18,941	19,993	93,630	0,947
Vanjski prostor	0,000	-0,005	4,985	99,960	--
Tlo	5,000	4,985	5,000	99,900	0,997



Slika 29 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini

Tablica 29  $\Psi$  vrijednosti D1-drugi slučaj

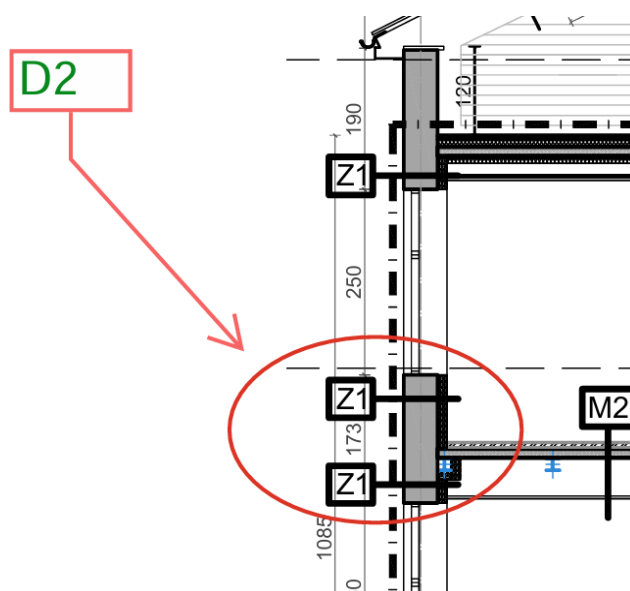
Granica	U – vrijednost	L	$\Delta T$	U x L
	[W/m <sup>2</sup> K]	[m]	[°C]	[W/mK]
Grijano/Vani	0,191	0,620	20,000	0,118
Grijano/Tlo	0,115	0,983	15,000	0,113
		Grijano/Vani	$\Psi$ [W/(mK)]=	0,114
		Grijano/Tlo	$\Psi$ [W/(mK)]=	0,039
			$\Sigma \Psi$ [W/(mK)]=	0,153

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 18,941 °C što je približno jednako rezultatu u prvom slučaju. Faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,947, dakle nema opasnosti od kondenzacije.



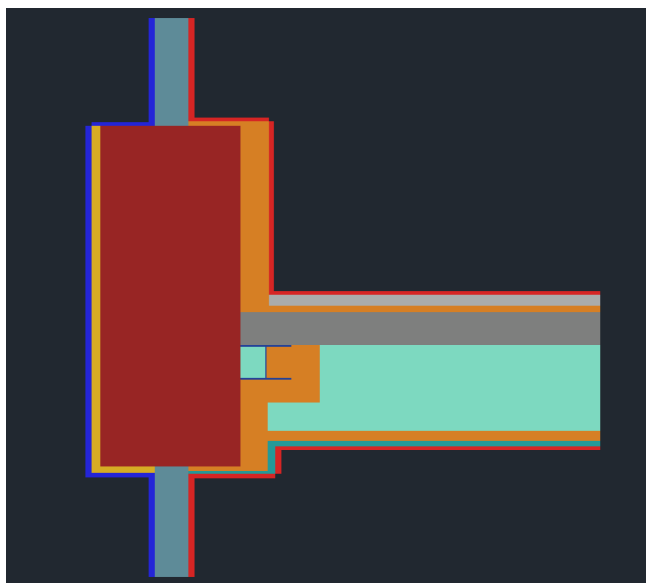
## 5.2. Detalj D2

Detalj D2 prikazuje spoj međukatne konstrukcije i vanjskog zida. Problematika u ovom spoju leži u čeličnoj gredi koja pridržava međukatnu konstrukciju. Kako bi se izbjegao toplinski most, oko čelične grede postavljena je toplinska izolacija od ovčje vune prekrivena parnom branom. Izveden je i spuštenu strop, a sam detalj detaljnije je razrađen u prilogu A. Vanjski zid izrađen je od opeke debljine 50 cm, toplinski se izolira s unutarnje strane ovčjom vunom debljine 10 cm. Na vunu se polaže parna brana i dva sloja gipskartonskih ploča ukupne debljine 2,5 cm. Vanjska se strana zida oblaže vapneno – cementnom žbukom debljine 3 cm na koji ide sloj polimer-cementnog ljepila s armaturnom mrežicom i na kraju sloj silikatne završne žbuke.



Slika 30 Prikaz detalja na presjeku zgrade

Za potrebe proračuna izrađen je pojednostavljeni nacrt detalja D2 te spremljen u .dxf obliku kako bi se mogao učitati u računalnom programu Crolal i provesti daljnji proračun.



Slika 31 Model detalja D2

Tablica 30 Svojstva materijala

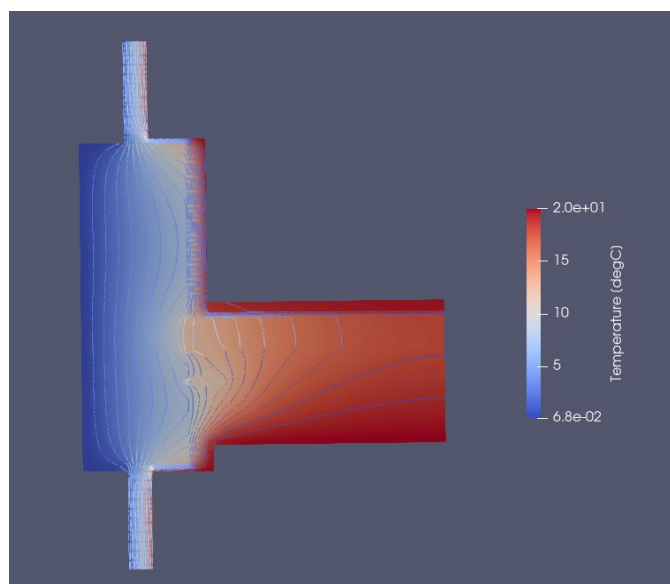
Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	$\mu$
Opeka	0,48	910	850	8,00
Toplinska izolacija	0,04	19	1700	1,00
Prozor	0,13	1,00	1,00	100000,00
Zbuka	1,60	450	900	50,00
Gipskartonska ploča	0,21	850	870	4,00
Zrak	0,03	1,00	1,00	1,00
Celicna greda	16,00	8000	380	100000,00
Cementni Estrih	2,6	2100	776	50,00
Armirani beton	2,60	2100	110	110,00

Tablica 31 Rubni uvjeti

Granica	$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	$T$ [°C]	RH [%]
Interior	7,69	20,00	60,00
Exterior	25,00	0,00	60,00

Tablica 32 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D2

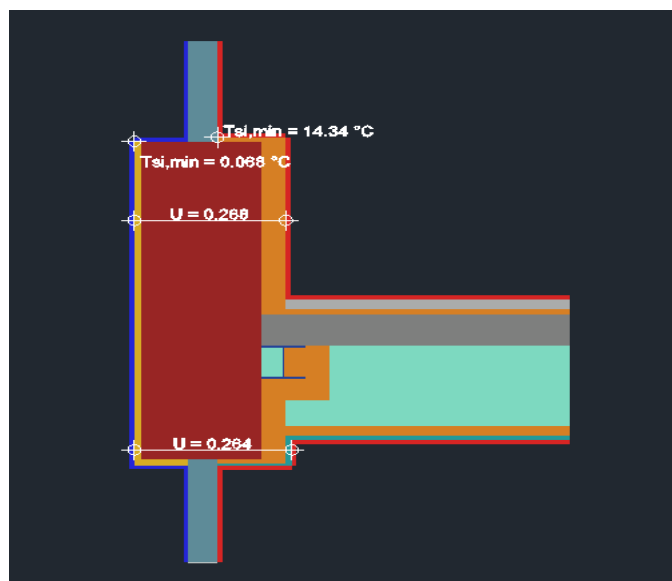
Room	L2D [W/mK]	
	Grijani prostor	Vanjski prostor
Grijani prostor	0,00000	1,73125
Vanjski prostor	1,73125	0,00000



Slika 32 Temperaturni prikaz detalja D2

Tablica 33 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D2

Granica	Temp. zraka	Min. površinska temp.	Max. površinska temp.	RH [%]	$f_{Rsi}$
	[°C]	[°C]	[°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	14,340	19,979	69,890	0,717
Vanjski prostor	0,000	0,068	1,902	100,000	0,000



Slika 33 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini

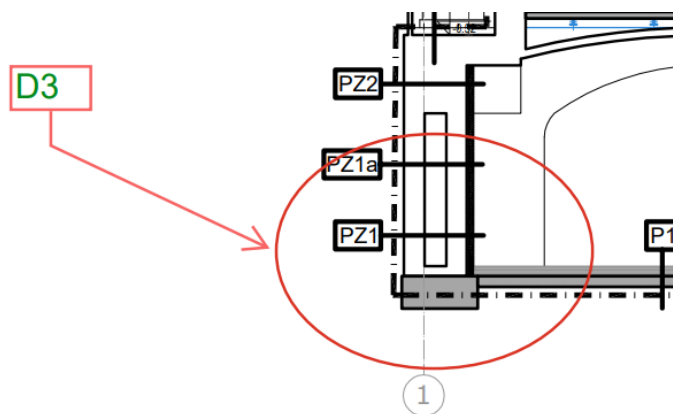
Tablica 34  $\psi$  vrijednosti D2

Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/Vani	0,264	0,634	20,000	0,167
Grijano/Vani	0,268	1,340	20,000	0,359
		Grijano/Vani	$\sum \psi$ [W/(mK)]=	1,205

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 14,340 °C i nalazi se na spoju prozora i zida, faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,717 što znači da neće doći do kondenzacije ni u ovom detalju.

### 5.3. Detalj D3

Detalj D3 prikazuje temelj konstrukcije izrađen od opeke i spoj podrumskog zida i poda na tlu.

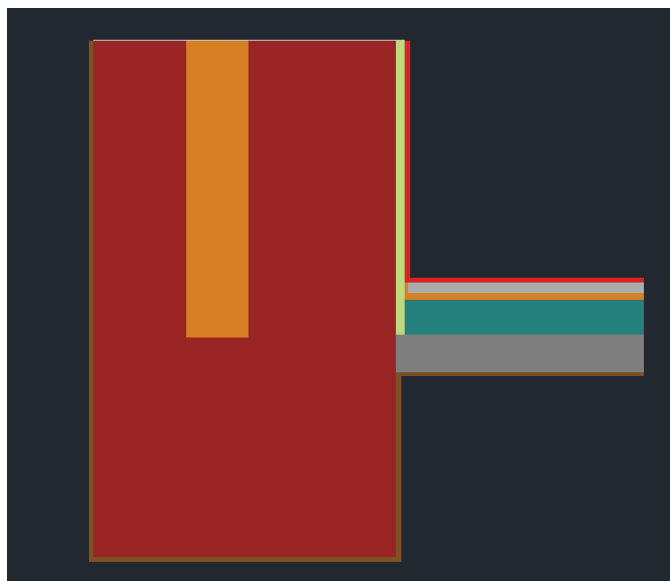


Slika 34 Detalj D3 na presjeku zgrade

#### 5.3.1. Detalj D3 – prvi slučaj

Hidroizolacija podrumskog zida napravljena je korištenjem sustava za unutarnju hidroizolaciju podruma. Toplinska je izolacija izvedena granulama ekspaniranog polistirena između dva sloja zidanog zida. Podna AB ploča obložena je bitumenskom ljepenkom na koju je položeno 16 cm XPS-a, 3 cm mineralne vune, cementni estrih i parket. U nastavku je prikazan razrađen detalj D3 s prvi rješenjem.

Za potrebe proračuna napravljen je pojednostavljeni model detalja D3.



Slika 35 Model detalja D3 – prvi slučaj

Tablica 35 Svojstva materijala

	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	$\mu$
	Armirani beton	2,60	2100	776	76
	Opeka	0,48	1800	800	8,00
	Toplinska izolacija	0,04	60	850	1,30
	Xps	0,04	1,00	1,00	150,00
	Cementni estrih	0,82	1800	900	16
	Vodootporna zbuca	1,60	1300	800	15,00

Tablica 36 Rubni uvjeti

	Granica	$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	$T$ [°C]	RH [%]
	Interior	7,69	20,00	60,00
	Tlo	999999999,00	5,00	60,00

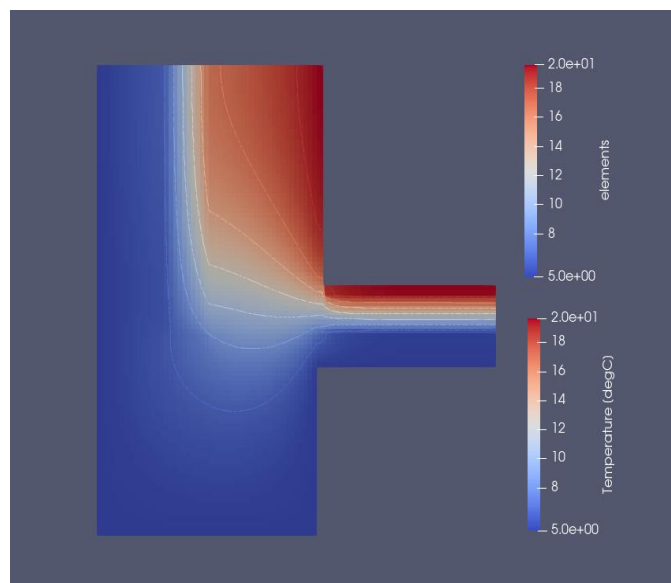
Tablica 37 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D3 – prvo rješenje

	L2D [W/mK]	
Room	Grijani prostor	Vanjski prostor
Grijani prostor	0,00000	1,76194

Vanjski prostor

1,76194

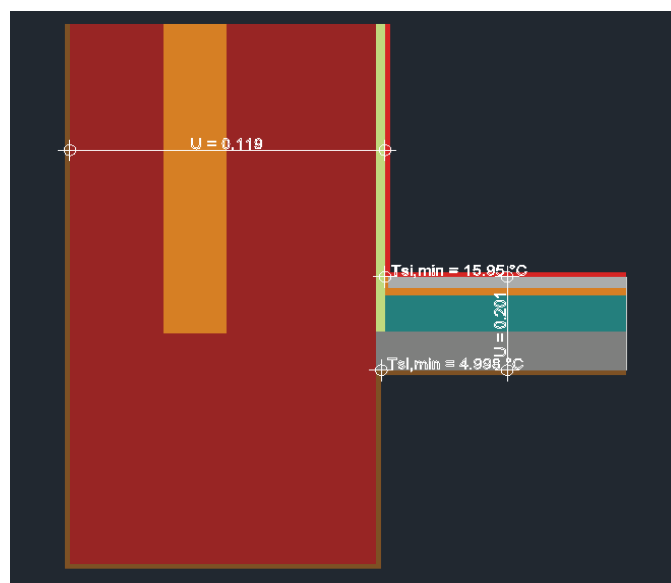
0,00000



Slika 36 Temperaturni prikaz detalja D3

Tablica 38 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D3- prvi slučaj

Granica	Temp. zraka [°C]	Min.	Max.	RH [%]	$f_{Rsi}$
		površinska temp. [°C]	površinska temp. [°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	15,950	19,617	77,520	0,730
Tlo	5,000	4,998	5,047	99,990	--



Slika 37 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini

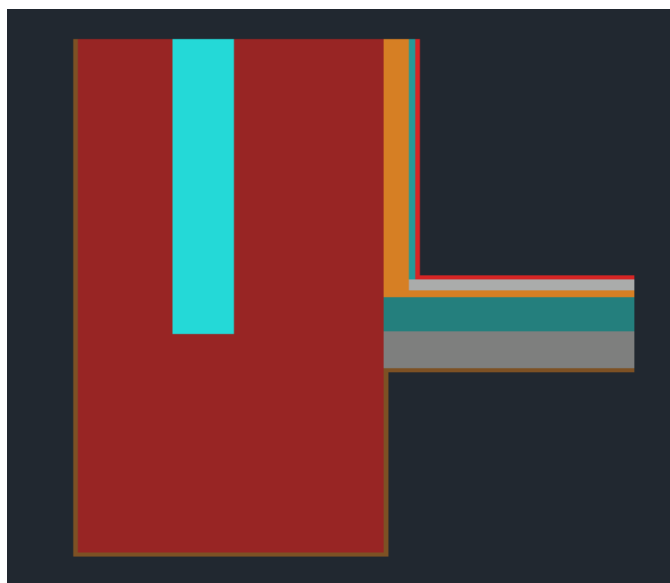
Tablica 39  $\Psi$  vrijednosti D3-prvi slučaj

Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/Vani	0,201	0,965	15,000	0,194
Grijano/Vani	0,119	1,110	15,000	0,132
		Grijano/Vani	$\sum \Psi$ [W/(mK)] =	0,436

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 15,95°C, a faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,730 čime smo dokazali da nema opasnosti od kondenzacije.



## 5.3.2. Detalj D3 – drugi slučaj



Slika 38 Pojednostavljeni prikaz detalja D3- drugi slučaj

Tablica 40

	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	$\mu$
	Armirani beton	2,60	2100	776	76
	Opeka	0,48	1800	800	8,00
	Toplinska izolacija	0,04	60	850	1,30
	Xps	0,04	1,00	1,00	150,00
	Cementni estrih	0,82	1800	900	16
	Zrak	0,18	1	1000	1

Tablica 41 Rubni uvjeti

	Granica	$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	$T$ [°C]	RH [%]
	Interior	7,69	20,00	60,00
	Tlo	999999999,00	5,00	60,00

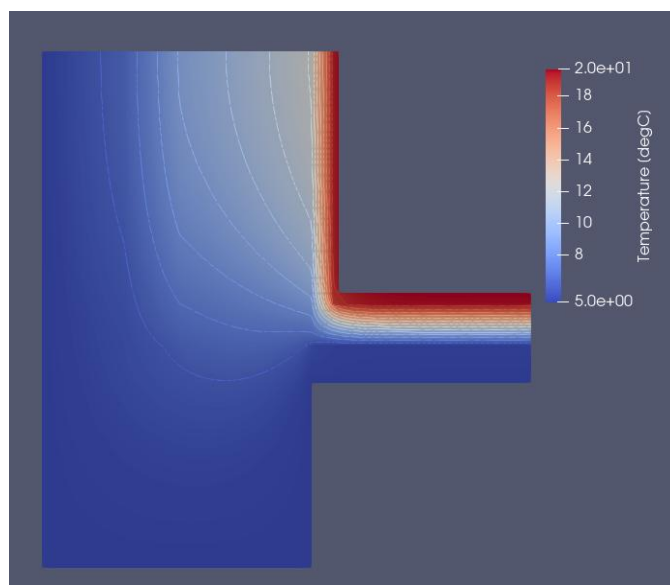
Tablica 42 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D3 – drugi slučaj

	L2D [W/mK]	
Room	Grijani prostor	Vanjski prostor
Grijani prostor	0,00000	0,40365

Vanjski prostor

0,40365

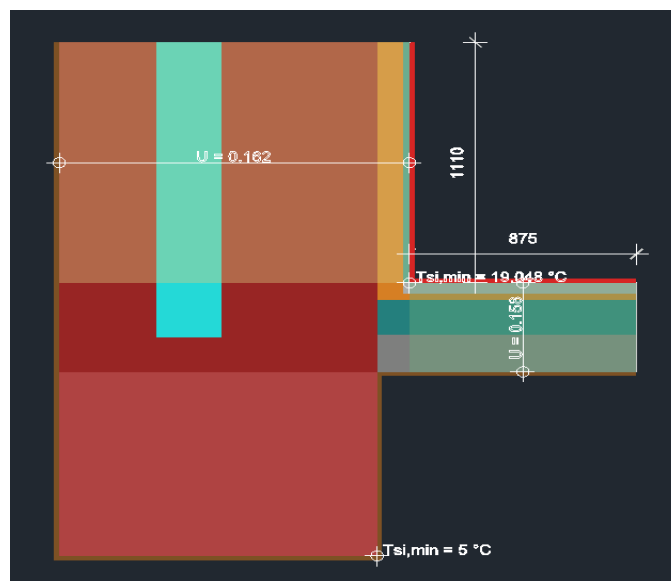
0,00000



Slika 39 Temperaturni prikaz detalja D3 – drugi slučaj

Tablica 43 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D3 drugi slučaj

Granica	Temp. zraka [°C]	Min.	Max.	RH [%]	$f_{Rsi}$
		površinska temp. [°C]	površinska temp. [°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	19,048	19,692	94,260	0,937
Tlo	5,000	5,000	5,015	100,000	--



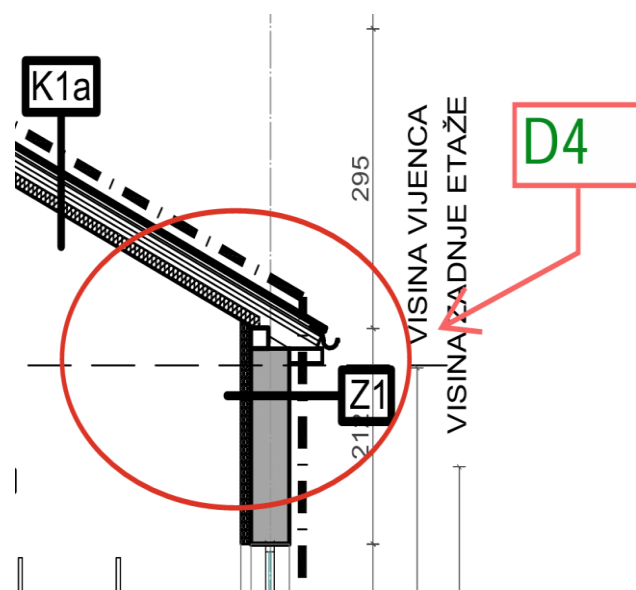
Slika 40 U – vrijednosti detalja D3 -drugi slučaj

Tablica 44  $\Psi$  vrijednosti D3-drugi slučaj

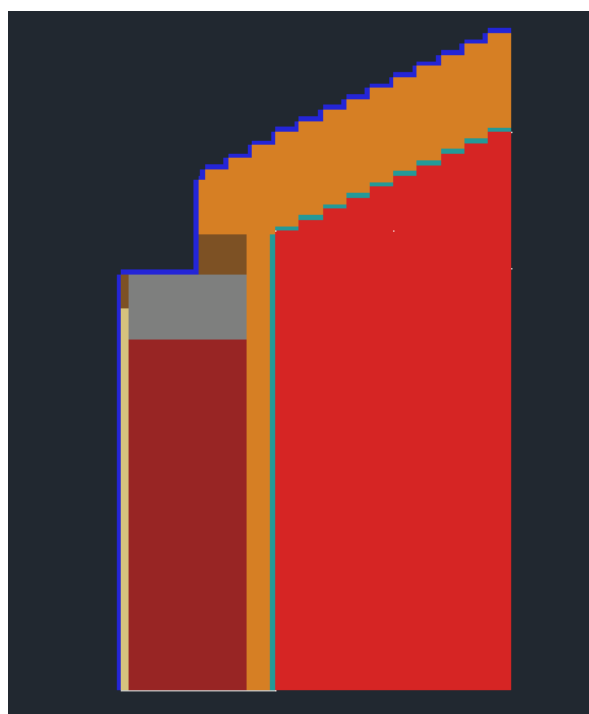
Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/Vani	0,158	0,875	15,000	0,138
Grijano/Vani	0,162	1,110	15,000	0,180
		Grijano/Vani	$\sum \Psi$ [W/(mK)]=	0,086

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 19,048°C, a faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,937 čime smo dokazali je opasnost od kondenzacije manja nego u prvom slučaju.

## 5.4. Detalj D4









Slika 41 Detalj D4





Slika 42 Pojednostavljeni prikaz detalja D4

Tablica 45 Karakteristike materijala

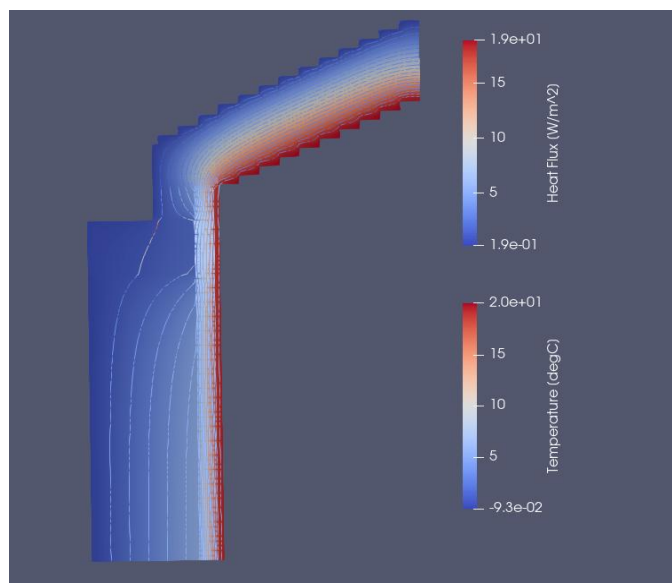
	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kgK]	$\mu$
	Opeka	0,48	910	850	8,00
	Armirani beton	2,60	2100	776	76
	Drvo	0,20	800	1700	48
	Toplinska izolacija	0,04	60	850	1,00
	Gipskartonske ploce	0,21	850	870	6,00
	Zbuka	1,60	1300	800	15

Tablica 46 Rubni uvjeti

	Granica	h [W/m <sup>2</sup> K]	T [°C]	RH [%]
	Interior	7,69	20,00	60,00
	Exterior	25,00	0,00	60,00

Tablica 47 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D4

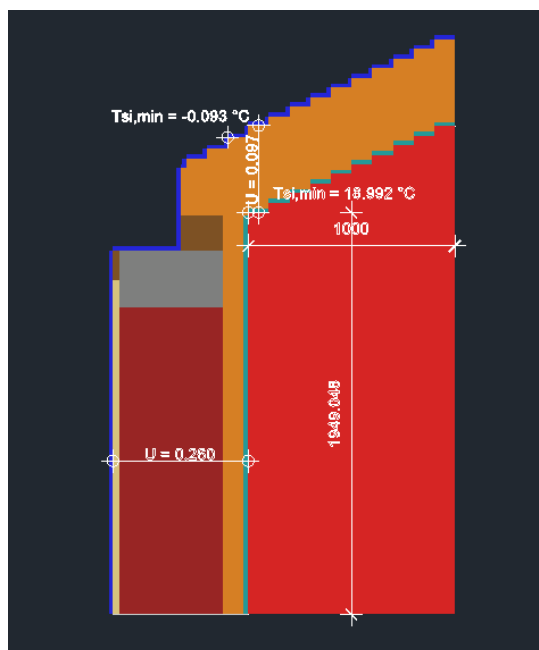
	L2D [W/mK]	
Room	Grijani prostor	Vanjski prostor
Grijani prostor	0,00000	0,69156
Vanjski prostor	0,69156	0,00000



Slika 43 Temperaturni prikaz detalja D4

Tablica 48 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i  $f_{Rsi}$  faktor – D4

Granica	Temp. zraka [°C]	Min.	Max.	RH [%]	$f_{Rsi}$ [-]
		površinska temp. [°C]	površinska temp. [°C]		
Grijani prostor	20,000	18,992	19,955	93,930	0,950
Tlo	0,000	-0,093	0,763	99,240	--



Slika 44 U – vrijednosti detalja D4 i minimalne temperature

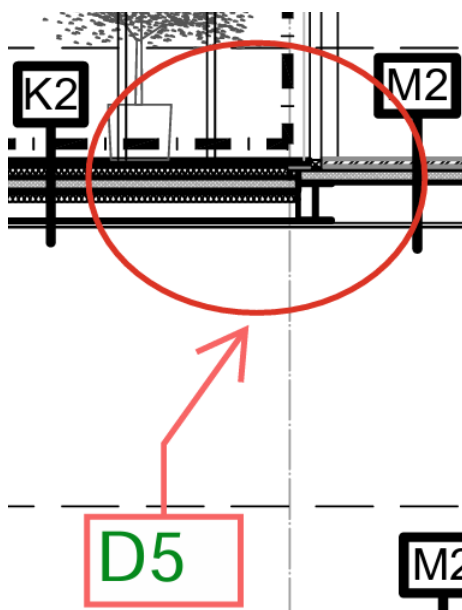
Tablica 49  $\Psi$  vrijednosti D4

Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/Vani	0,260	1,949	20,000	0,507
Grijano/Vani	0,097	1,000	20,000	0,097
		Grijano/Vani	$\sum \Psi$ [W/(mK)] =	0,088

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 18,992°C, a faktor  $f_{Rsi}$  iznosi 0,950 što znači da u detalju neće doći do kondenzacije.

## 5.5. Detalj D5

Detalj D5 predstavlja spoj ravnog krova, međukatne konstrukcije i balkonskih vrata. Kako bi se osigurala zrakonepropusnost, balkonska su vrata ugrađena RAL ugradnjom. S unutrašnje strane brtve se paronepropusnom brtvom, a s vanjske paropropusnom i vodonepropusnom.



Slika 45 Detalj D5








Slojevi ravnog krova odabrani tako da na AB ploču poliježemo XPS u nagibu, zatim sloj bitumenske hidroizolacije, potom 5 cm XPS-a i na kraju membranu od polietilena koja pospješuje odvodnju s ravnog krova. Kao podna obloga odabrane su betonske ploče na distancerima. S donje strane AB ploče izrađen je spuštenu stop kojeg čini ovčja vuna i dva sloja gipskartonskih ploča.





Slika 46 Pojednostavljeni prikaz detalja D5

Tablica 50 Svojstva materijala

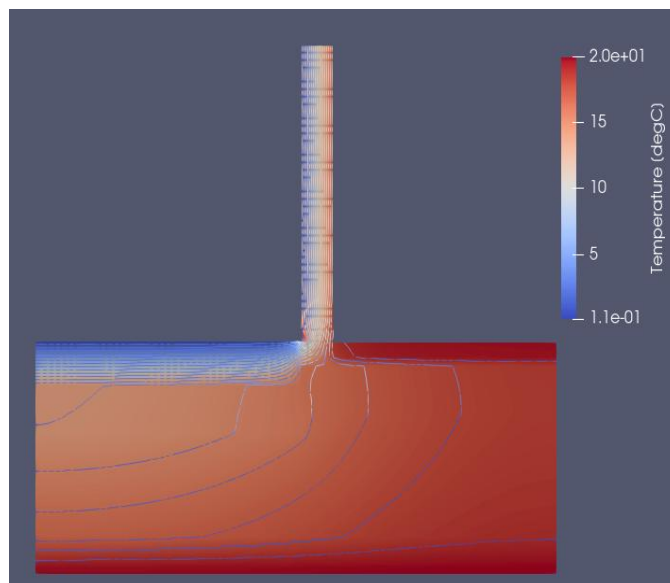
	Materijal	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kgK]	$\mu$
	Gipskartonske ploce	0,21	850,00	870,00	6,00
	Toplinska izolacija	0,04	60,00	850,00	1,30
	Prozor	0,13	1,00	1,00	100000,00
	XPS	0,03	29,00	1470,00	170,00
	Cementni estrih	0,82	1800,00	900,00	16,00
	Ytong	0,13	500,00	850,00	8,00
	Armirani beton	2,60	2100,00	776,00	76,00
	Zrak	0,18	1,00	1000,00	1,00

Tablica 51 Rubni uvjeti

	Granica	h [W/m <sup>2</sup> K]	T [°C]	RH [%]
	Interior	7,69	20,00	60,00
	Exterior	25,00	0,00	60,00

Tablica 52 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D5

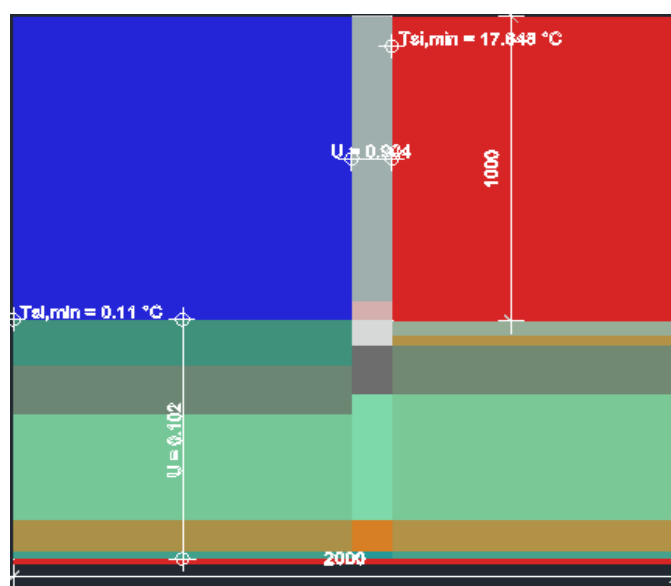
Room	L2D [W/mK]	
	Grijani prostor	Vanjski prostor
Grijani prostor	0,00000	1,18667
Vanjski prostor	1,18667	0,00000



Slika 47 Temperaturni prikaz detalja D5

Tablica 53 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i fRsi factor – D5

Granica	Temp. zraka	Min. površinska temp.	Max. površinska temp.	RH [%]	fRsi
	[°C]	[°C]	[°C]	RH [%]	[-]
Grijani prostor	20,000	17,648	19,949	86,340	0,882
Vanjski prostor	0,000	0,110	4,205	100,000	--



Slika 48 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini

Tablica 54  $\Psi$  vrijednosti D5

Granica	U – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K]	L [m]	$\Delta T$ [°C]	U x L [W/mK]
Grijano/Vani	0,102	2,000	20,000	0,204
Grijano/Vani	0,904	1,000	20,000	0,904
		Grijano/Vani	$\sum \Psi$ [W/(mK)] =	-0,007

Minimalna temperatura koja se javlja na površini iznosi 17,648 °C, a  $f_{Rsi}$  iznosi 0,882 što znači da smo na strani sigurnosti te neće doći do kondenzacije.

## 6. UTJECAJ VLAGE

Vrste vlage mogu se podijeliti u tri glavne skupine. Prva skupina obuhvaća likvidnu vlagu koja nastaje zbog tekuće vode poput kiše, poplava i podzemnih voda. Druga skupina je higroskopna vlaga, koja se javlja kada soli iz likvidne vlage pohranjene u zidu upijaju vodenu paru iz okoliša. Treća skupina je kondenzacijska vlaga koja nastaje kada se topao zrak susreće s hladnijim zrakom. [19]

Kapilarna vlaga nastaje kada voda dospijeva u zidove građevinskih objekata putem kapilara, odnosno malih cjevčica unutar materijala, koje omogućuju prijenos vode. Ova voda može doći iz različitih izvora, poput kiše nošene vjetrom, curenja iz instalacija ili vode iz tla. Zbog svoje male veličine, kapilare mogu podići vodu na visinu, a kapilare manjih promjera podižu vodu na veću visinu nego one širih promjera. Kapilarna vlaga je česta u starim građevinama koje nemaju odgovarajuću hidroizolaciju, ili je nepravilno postavljena. Kao rezultat toga, voda se podiže iz tla u zidove. Ovaj proces može dovesti do oštećenja objekta u obliku odvajanja boje, raspadanja žbuke, pojave bijelih kristala soli, plijesni i neugodnih mirisa. Kapilarna vlaga može također nastati nakon poplava ili zbog visokog nivoa podzemne vode. [19]

Higroskopna vlaga nastaje kada soli u građevinskom materijalu upijaju vlagu iz zraka, pri čemu količina vlage raste s povećanjem vlažnosti zraka, ovisno o udjelu soli. Soli mogu doći u zid iz različitih izvora, poput tla preko kapilarne vlage, već prisutnih u materijalu prije ugradnje, iz morskog pijeska ili portland-cementa, te isparavanjem vlage na površini zida, gdje se sol kristalizira i stvara mrlje. [19]

Kondenzacija, odnosno rošenje vodene pare, obično se javlja na unutarnjim površinama građevinskih dijelova. Do nje dolazi kada su površine zidova i prozora hladnije od temperature zraka u prostoriji. Glavni uzroci kondenzacije uključuju visoku vlažnost zraka, lošu toplinsku izolaciju, neučinkovito prozračivanje i nepravilnu primjenu građevinskih materijala. Posljedice uključuju propadanje materijala, kao i pojavu plijesni. U novim zgradama, zbog slabog prozračivanja, može doći do zadržavanja vlage u konstrukciji, što pogoršava uvjete za plijesan. Kondenzacija nastaje kada apsolutna vlažnost poraste, a temperatura površine zida padne ispod točke rosišta, što potiče stvaranje plijesni i razvoj gljivica. Uvjeti za kondenzaciju su povoljniji u hladnijim prostorima i kada zrak s većom vlagom dospije na hladnu površinu. [19]

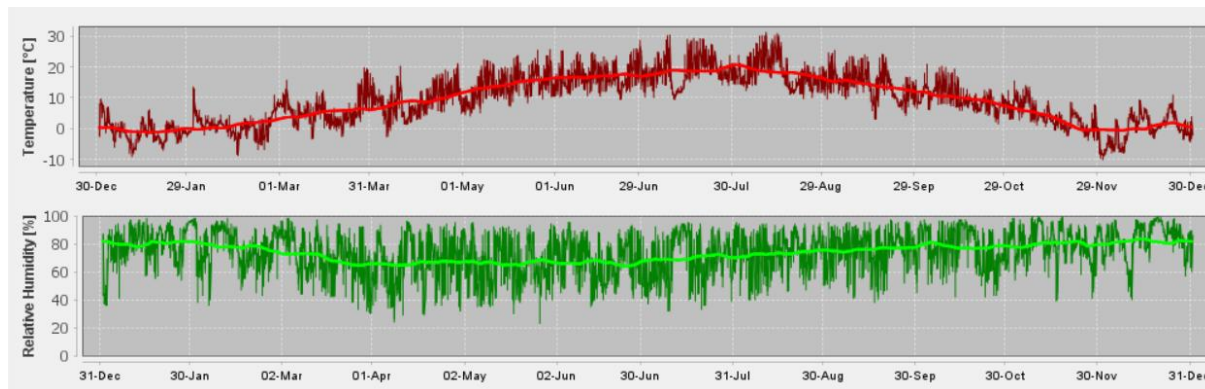
## 6.1. Proračun difuzije vodene pare

Tradicionalna metoda za procjenu ravnoteže vlage u građevinskom element bila je Glaserova metoda koja analizira prijenos pare difuzijom. Međutim, ova metoda ne uzima u obzir kapilarni prijenos vlage i sposobnost sorpcije komponente, što smanjuje rizik od oštećenja u slučaju kondenzacije. Glaserova metoda također uzima u obzir samo transport vlage u stanju ravnoteže pod pojednostavljenim uvjetima, zbog toga ona ne može reproducirati pojedinačne kratkoročne događaje niti uzeti u obzir kišu i solarno zračenje. [20]

Na Fraunhofer IBP razvijena je obitelj softverskih alata WUFI® za najnoviju higrotermalnu analizu. WUFI® izvodi dinamičke simulacije povezivanja prijenosa topline i vlage. Metode omogućuju realističnu simulaciju higrotermalnih uvjeta u građevinskim komponentama i zgradama prema stvarnim klimatskim uvjetima. [20]

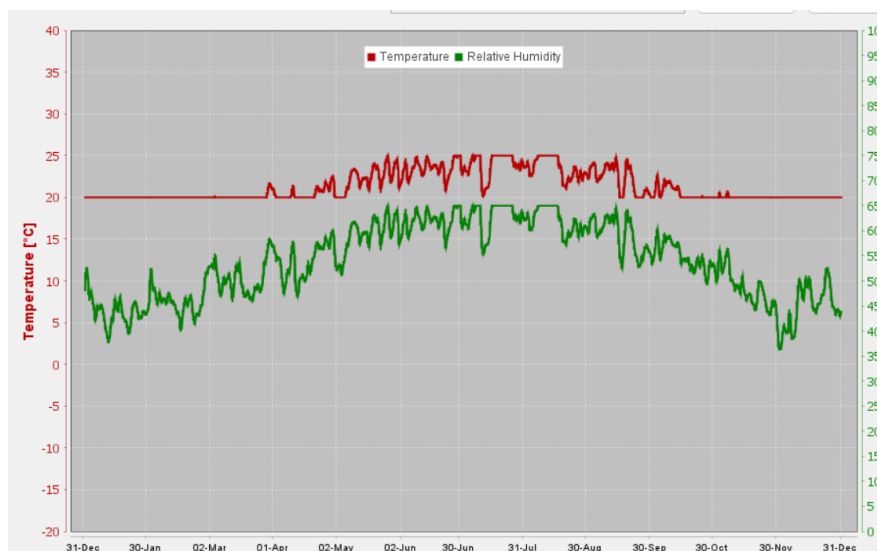
Proračun HAM modela proveden je u programskom paketu WUFI Light 6.3.2. koji je besplatna inačica Programa WUFI Pro.

Odabrana referentna klima je Innsbruck, a na slici ispod su prikazane raspodjele temperature i vlažnosti za navedeni grad.



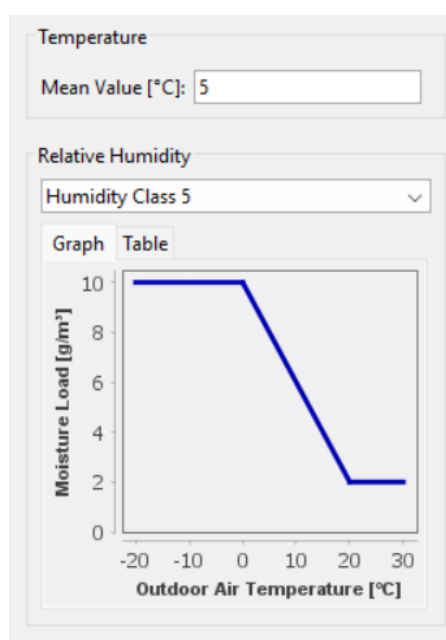
Slika 49 Klimatski uvjeti u Innsbrucku (WUFI Light)

Unutarnja je klima uzeta u obzir prema EN 15026, a uvjeti temperature i vlažnosti su prikazani na grafu ispod.



Slika 50 Unutarnji uvjeti

Rubni uvjeti tla zadani su prema ISO 13788, a zadana je konstantna temperatura od 5 °C. I relativna vlažnost razreda 5.

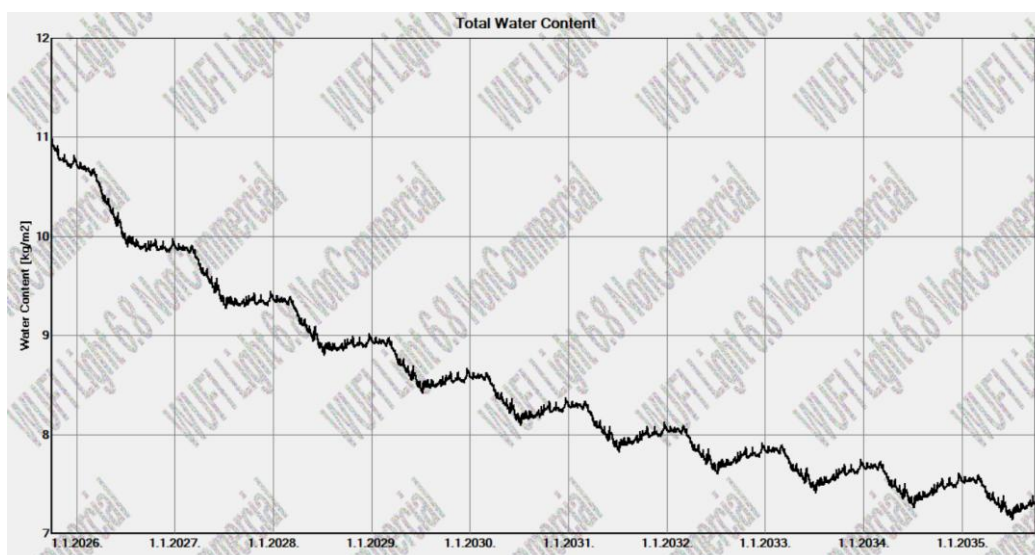


Slika 51 Higrotermalni uvjeti za tlo

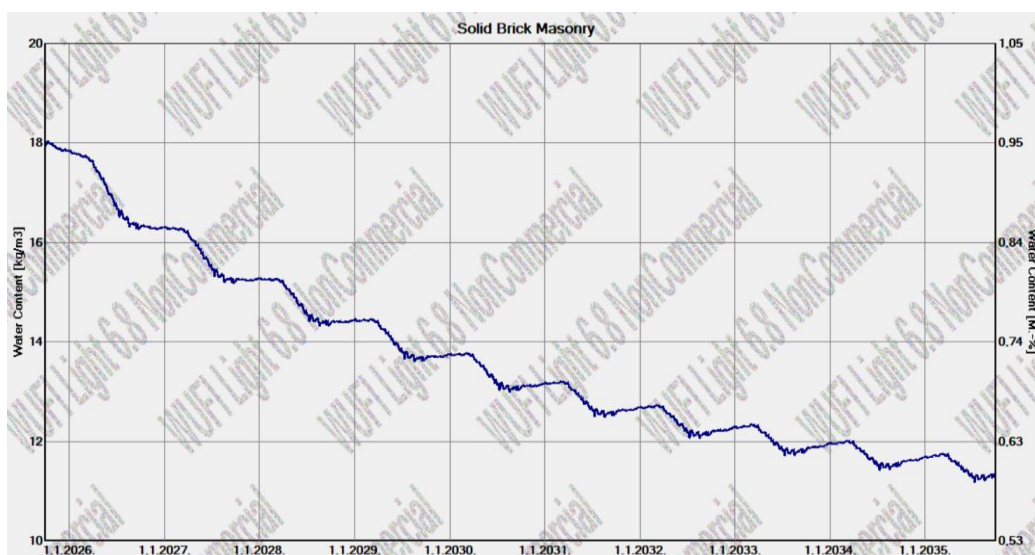
U korištenom programskom paketu nije moguće dodavati nove materijale pa su odabrani postojeći materijali najsličniji projektiranim materijalima.

### 6.1.1. Rezultati proračuna zidova na granici grijano – vani

Ukupna razina vlage pokazuje konstantan pad vlažnosti s ciklusima vlaženja i sušenja kroz proračunski vijek od deset godina. Iz toga se može zaključiti da ne dolazi do zaostajanja vlage u pojedinim elementima što je povoljno za konstrukciju. Grafovi s ukupnim sadržajem vlage prikazani su u nastavku.



Slika 52 Ukupna količina vlage u vanjskom zidu



Slika 53 Ukupna količina vlage u opeki

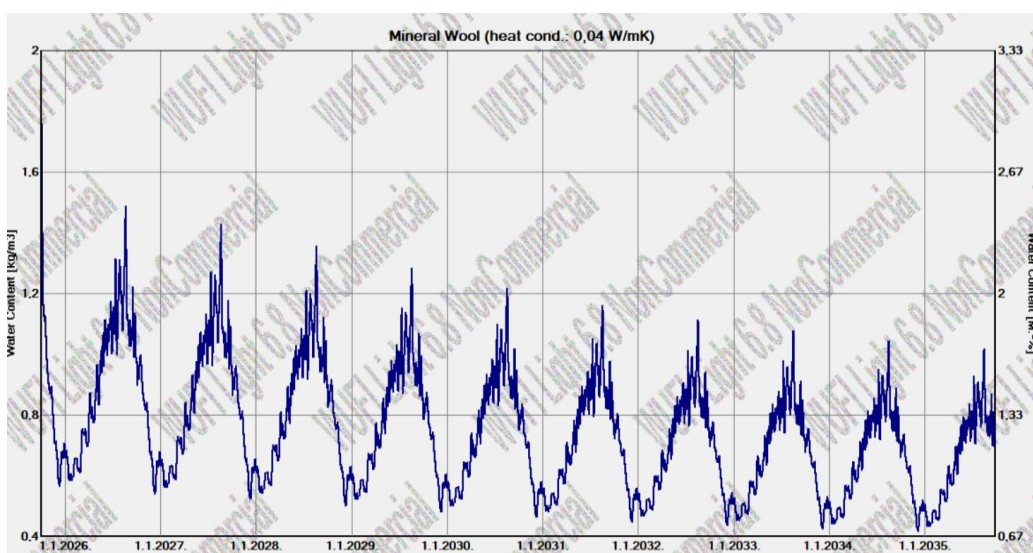
Water Content [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	11,02	7,31	7,14	11,02

Water Content [kg/m <sup>3</sup> ]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Knauf Conni S 2,0 auf SM700	15,90	14,15	7,55	67,71
Diathonite Deumix+	66,20	58,71	51,56	67,48
Solid Brick Masonry	18,00	11,31	11,18	18,04
Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	1,79	0,70	0,42	1,80
LDS 10	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board (USA)	6,19	3,31	2,41	6,19

Slika 54 Količina vlage u vanjskom zidu u 10-godišnjem razdoblju

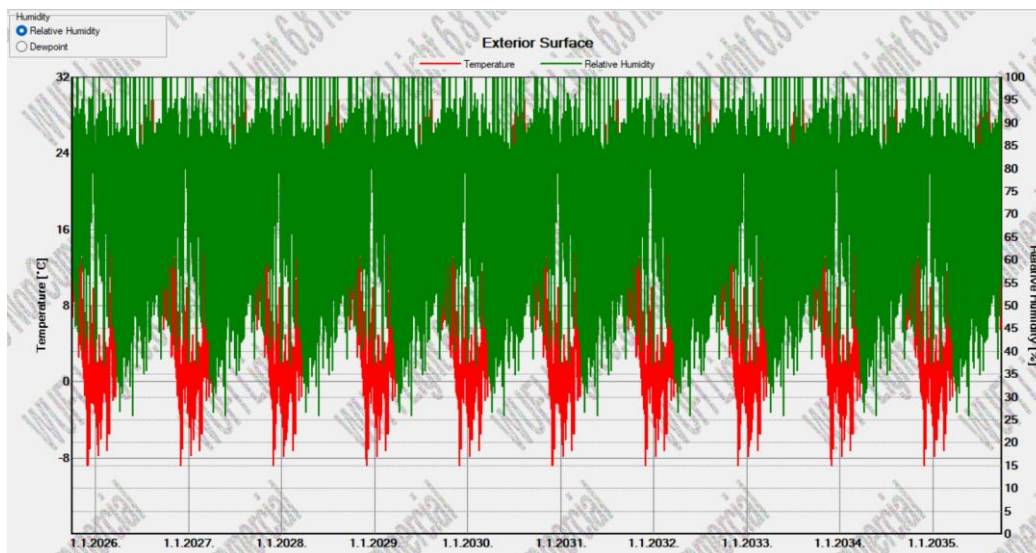
Analizom rezultata može se zaključiti da dolazi do sušenja konstrukcije. Vanjski je dio zida niže temperature zbog toplinske izolacije s unutarnje strane. Cirkulacijom toplijeg zraka iz unutarnje površine prema vanjskoj, vlažni zrak dolazi na hladnu plohu pri čemu dolazi do kondenzacije. Kako bi se spriječila ova pojava, između mineralne vune i gipskartonskih ploča umetnuta je parna brana. Zbog tih je razloga bitno obratiti pažnju na spoj toplinske izolacije i zida od opeke.



Slika 55 Količina vlage u sloju mineralne vune

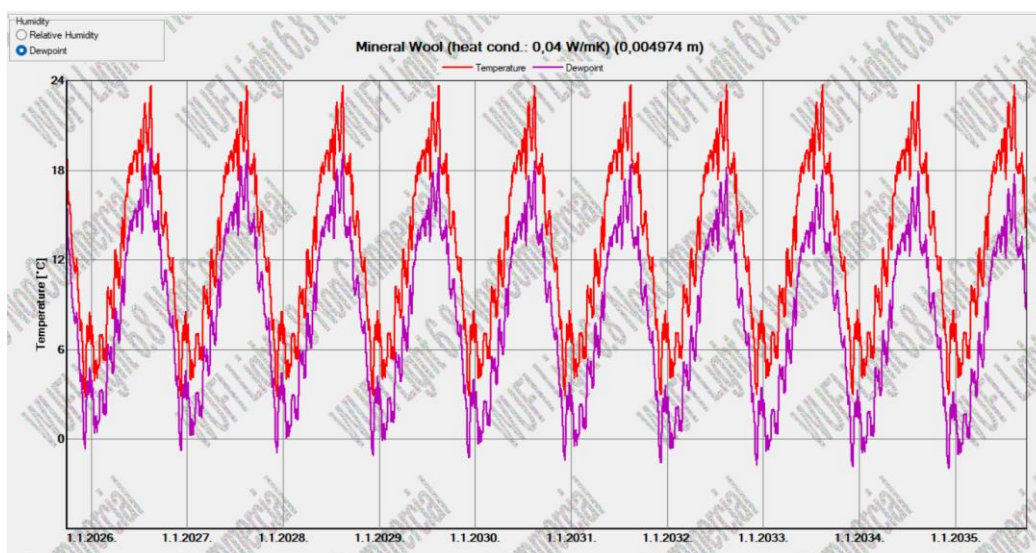


Odnos vanjske temperature na površini elementa i relativne vlažnosti je obrnuto proporcionalan. Dakle, kada dolazi do povećanja temperature vanjskog zraka, vrijednost relativne vlažnosti pada pri istoj količini vlage u zraku.



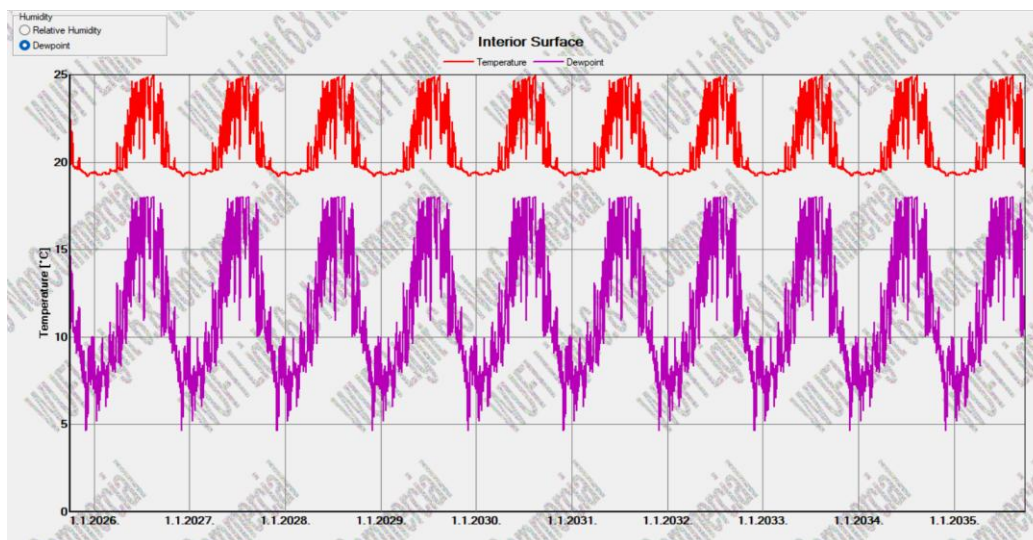
Slika 56 Odnos relativne vlažnosti i temperature na vanjskoj površini zida

U sloju mineralne vune, temperatura je uvijek veća od temperature rosišta, što znači da neće doći do kondenzacije na spoju mineralne vune sa opekom.



Slika 57 Odnos temperature na kritičnom dijelu mineralne vune i temperature rosišta

Unutarnja strana zida je prema rezultatima također sigurna od kondenzacije.

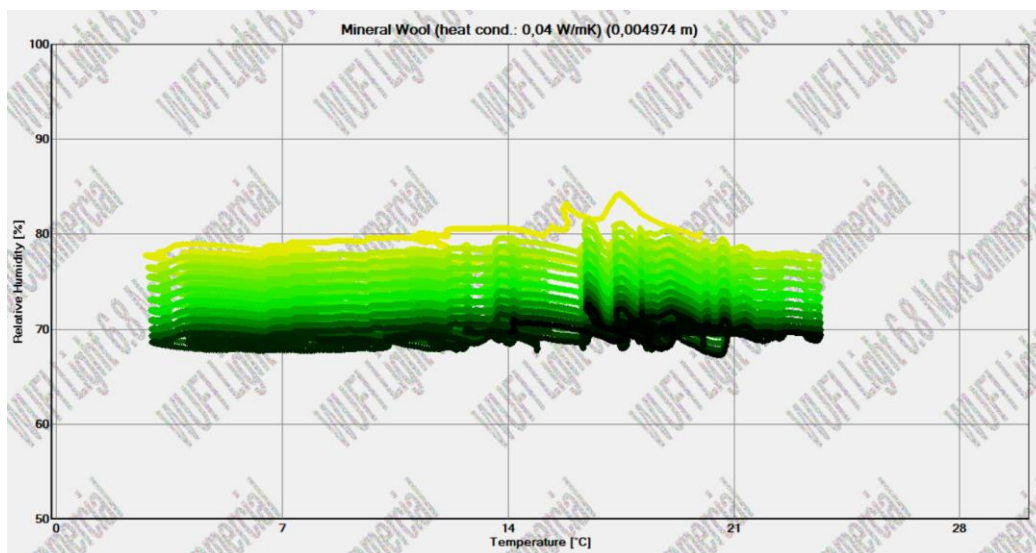


Slika 58 Odnos temperature unutarnje površine zida i temperature rosišta

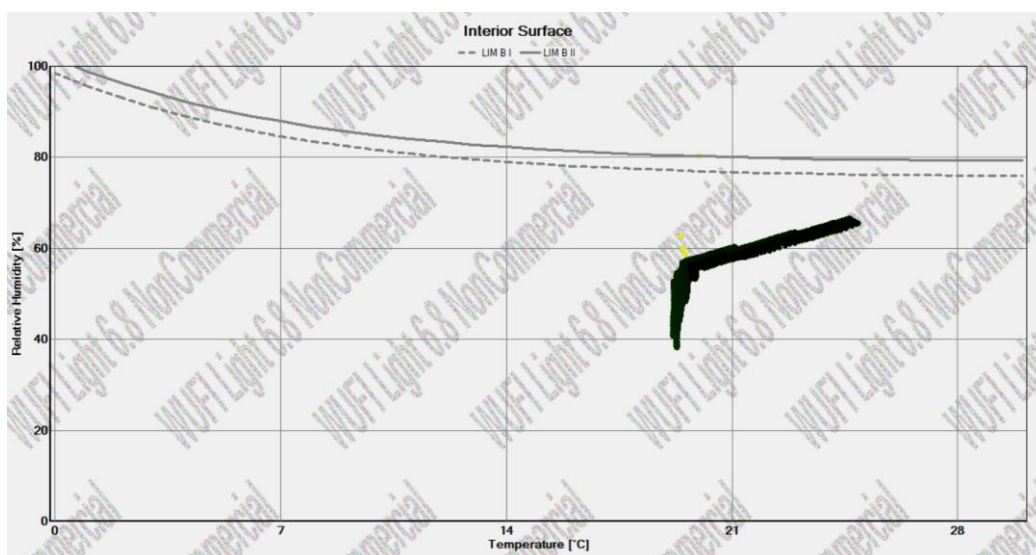
U nastavku su prikazane pojave kondenzacije pomoću takozvanih izopleta. One prikazuju relativnu vlažnost po vremenskim koracima u odnosu na pripadajuću temperaturu. Vremenska podjela koraka označena je bojama koje se kreću od žute prema crnoj. Žuta predstavlja prvi vremenski korak dok crna predstavlja zadnji. [18] Na navedenim grafovima možemo vidjeti pojavljuju li se istovremeno uvjeti visoke vlažnosti i visoke temperature što može dovesti do kondenzacije.

Rezultati prikazuju da su higrotermalni uvjeti ispod graničnih vrijednosti iznad kojih se javlja rizik od razvoja gljivica i plijesni, što znači da su provedene mjere prihvatljive.

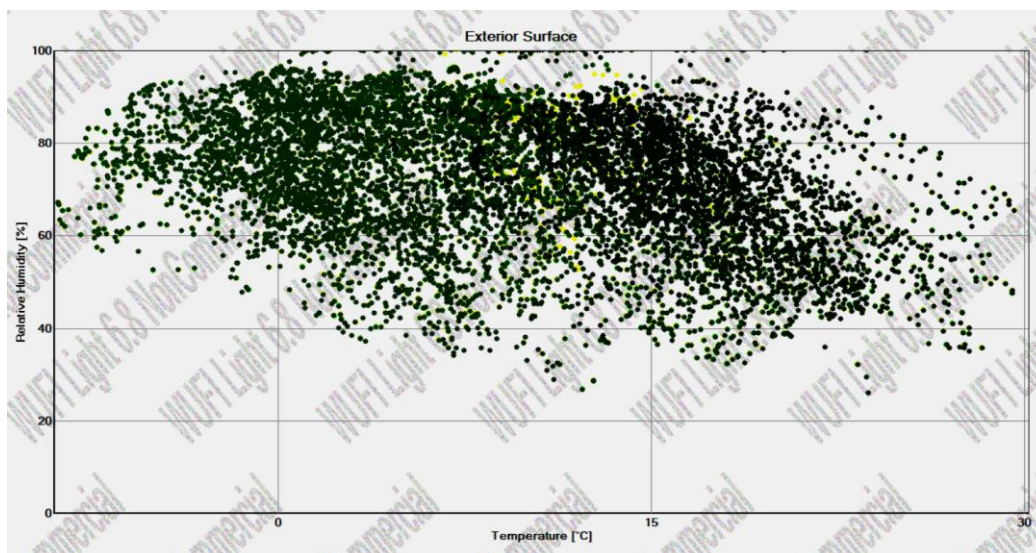
Za vanjsku površinu, ovaj model mjerenja nije prikladan jer unatoč lošim rezultatima neće doći do razvoja gljivica i plijesni zbog UV zračenja i mraza.



Slika 59 Izoplete za spoj mineralne vune i zida



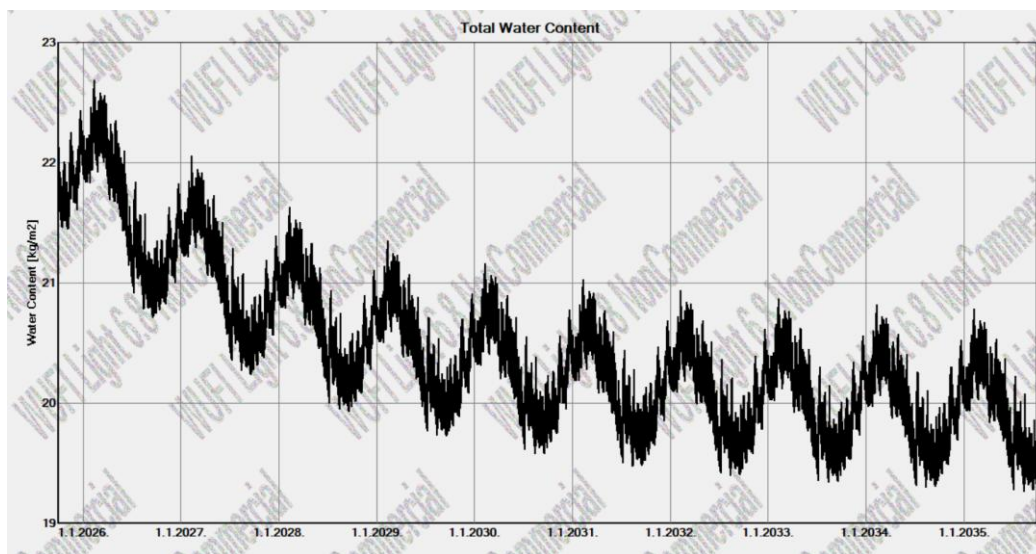
Slika 60 Izoplete na unutrašnjoj površini zida



Slika 61 Izoplete na vanjskoj površini zida

### 6.1.2. Rezultati proračuna krova

U slučaju ravnog krova kritični je sloj ekstrudiranog polistirena ispod bitumena i armiranobetonska ploča.



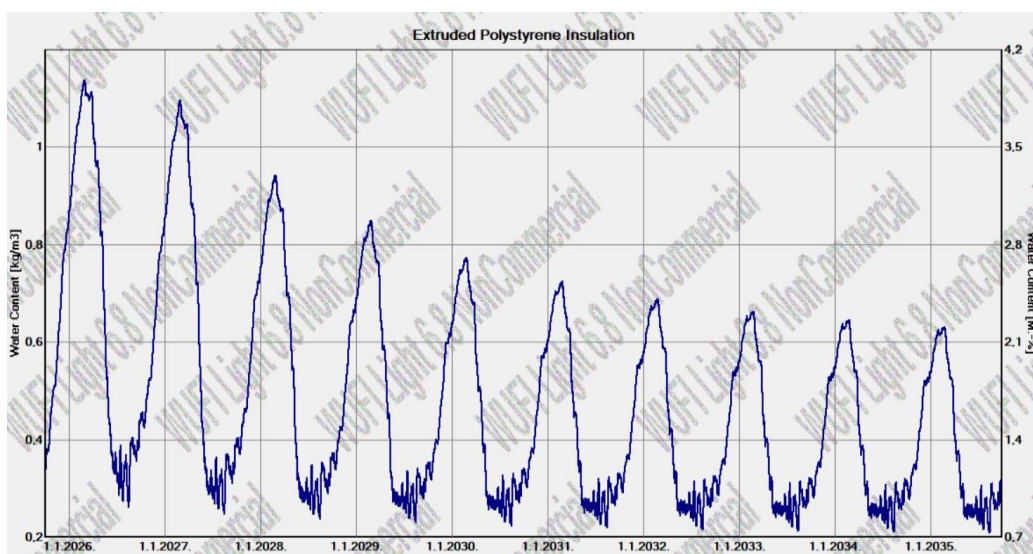
Slika 62 Ukupan sadržaj vlage u ravnom krovu

Water Content [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	21,8	19,48	19,27	22,68

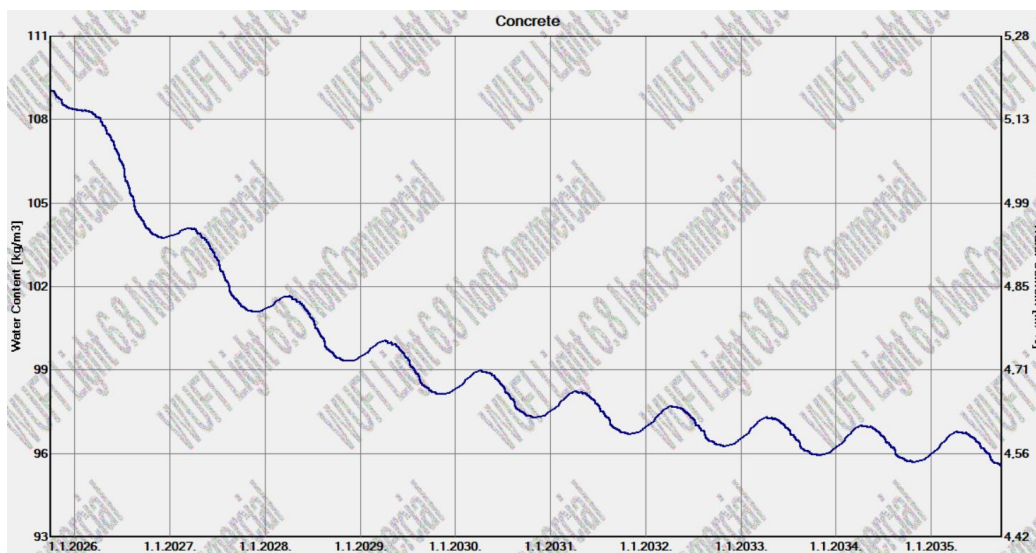
  

Water Content [kg/m <sup>3</sup> ]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Concrete, w/c=0.5	85,00	94,89	81,56	122,07
Air Layer 50 mm	1,88	3,31	1,82	6,00
Extruded Polystyrene Insulation	0,31	0,89	0,23	1,46
Roof Membrane V13	0,00	0,00	0,00	0,01
Roof Membrane V13	0,00	0,00	0,00	0,01
Extruded Polystyrene Insulation	0,31	0,30	0,21	1,14
Concrete	109,04	95,55	95,55	109,04
Air Layer 100 mm	1,88	0,90	0,82	1,88
Mineral Wool (heat cond.: 0.04 W/mK)	1,79	0,70	0,51	1,79
Gypsum Board (USA)	6,19	3,28	2,41	6,19

Slika 63 Ukupna količina vlage u 10-godišnjem razdoblju

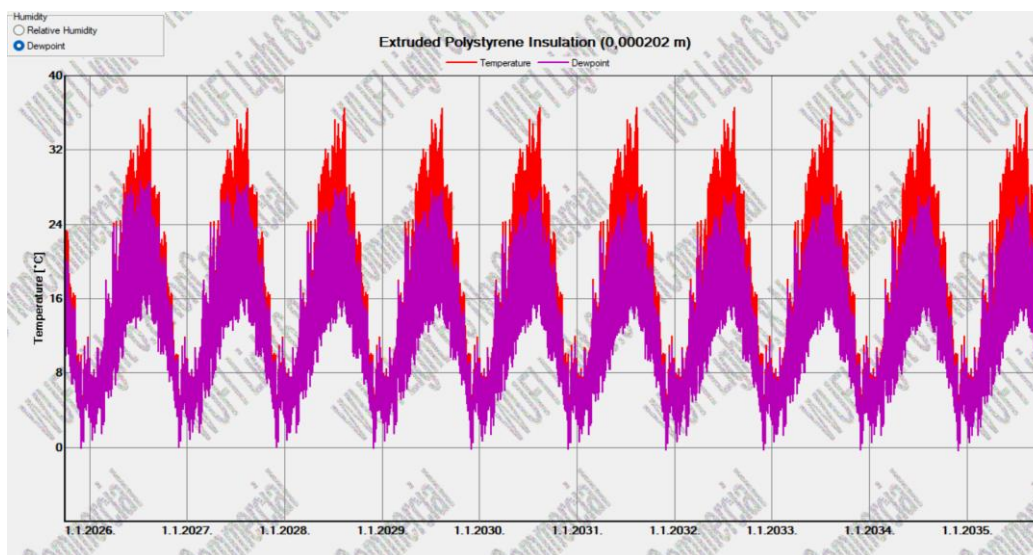


Slika 64 Ukupna količina vlage u ekstrudiranom polistirenu



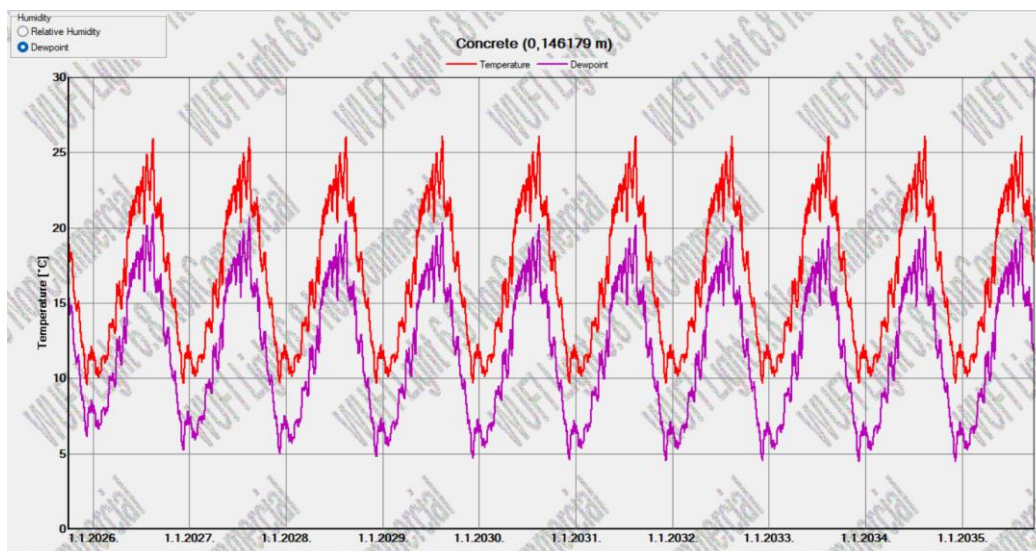
Slika 65 Ukupna količina vlage u sloju armiranog betona

U sloju ekspaniranog polistirena postignuta je dinamička ravnoteža tijekom čitavog razdoblja.



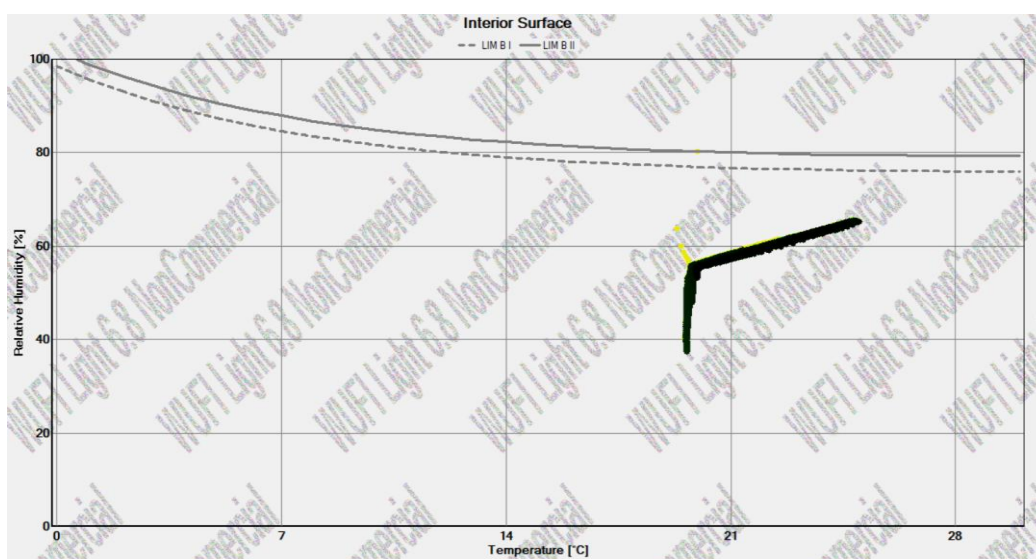
Slika 66 Prikaz temperature u sloju XPS-a i temperature rosišta

U armiranobetonskoj ploči postignuta je temperatura veća od temperature rosišta te nema opasnosti od kondenzacije.



Slika 67 Prikaz temperature betona i temperature rosišta u AB ploči

Izoplete prikazuju da su higrotermalni uvjeti manji od graničnih vrijednosti što znači da nema opasnosti od razvoja gljivica i plijesni.



Slika 68 Izoplete na unutrašnjoj strani zida

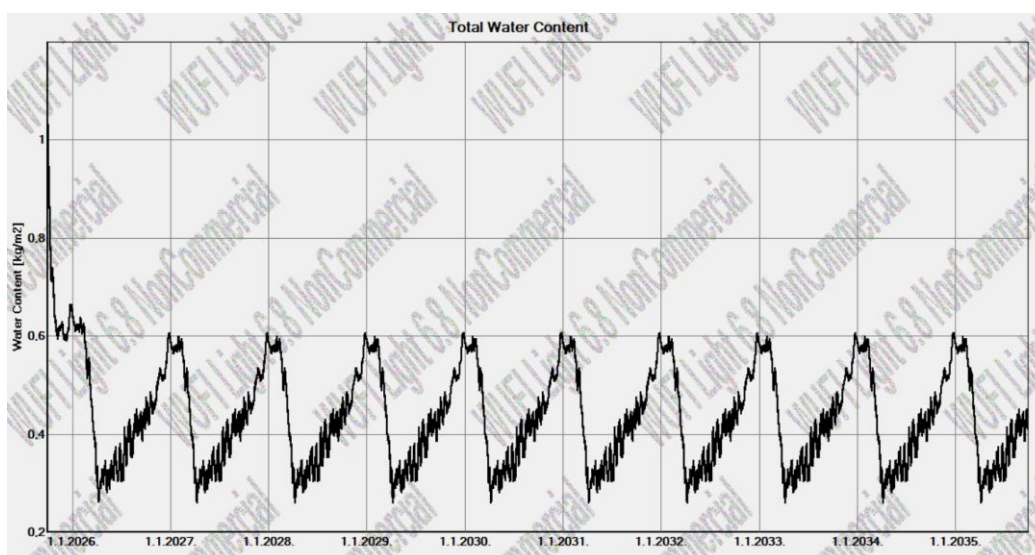
### 6.1.3. Kosi krov

Kod kosog krova bilo je potrebno posebno izmodelirati presjek kroz rog i presjek kroz mineralnu vunu.

#### 6.1.3.1. Presjek kroz mineralnu vunu

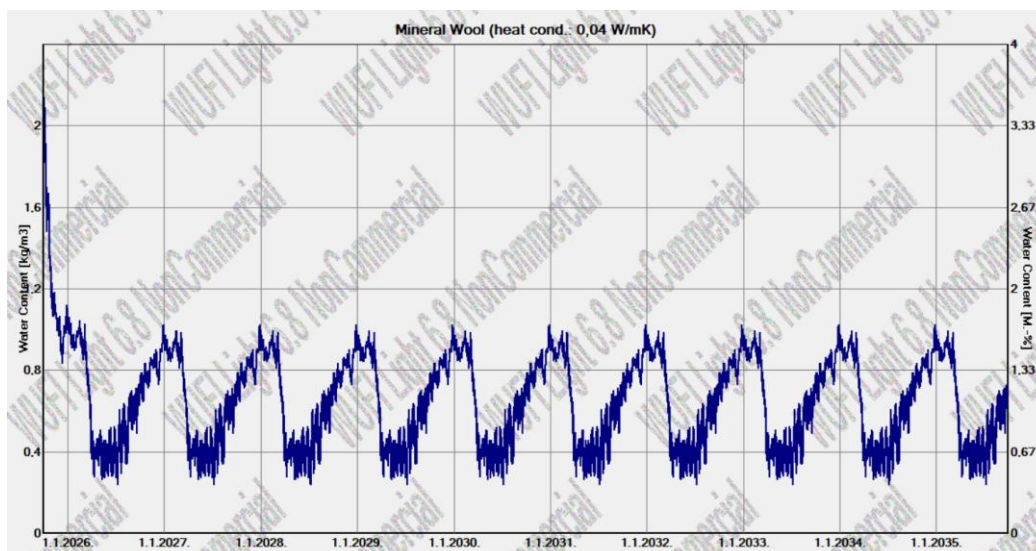
Initial Water Content in Different Layers			
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Solid Brick Masonry	0.015	18,0
2	Air Layer 50 mm	0.05	1,88
3	LDS 0.04	0.001	0,0
4	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.08	1,79
5	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.16	1,79
6	BARRIER NET SD40	0.001	0,0
7	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.08	1,79
8	Gypsum Board (USA)	0.025	6,19

Slika 69 Odabrani slojevi za presjek kroz mineralnu vunu



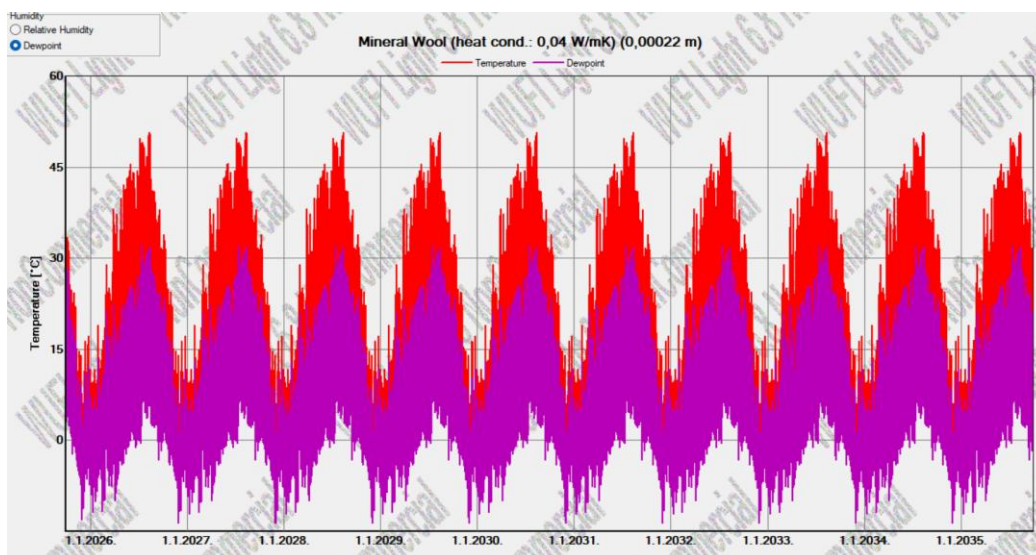
Slika 70 Ukupna količina vlage u presjeku krova kroz mineralnu vunu





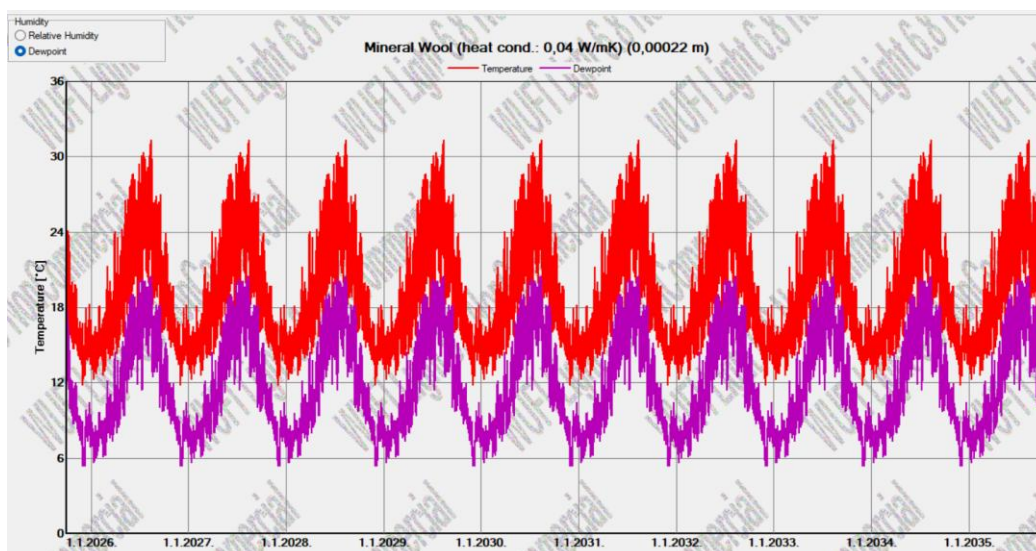
Slika 71 Ukupna količina vlage u zadnjem sloju mineralne vune.

U rezultatima je vidljivo da mineralna vuna koja leži ispod paropropusne – vodonepropusne folije uspostavlja dinamičku ravnotežu već nakon prve godine dana.



Slika 72 Temperatura u posljednjem sloju mineralne vune i temperature rosišta

U sloju mineralne vune postignuta je dinamička ravnoteža.



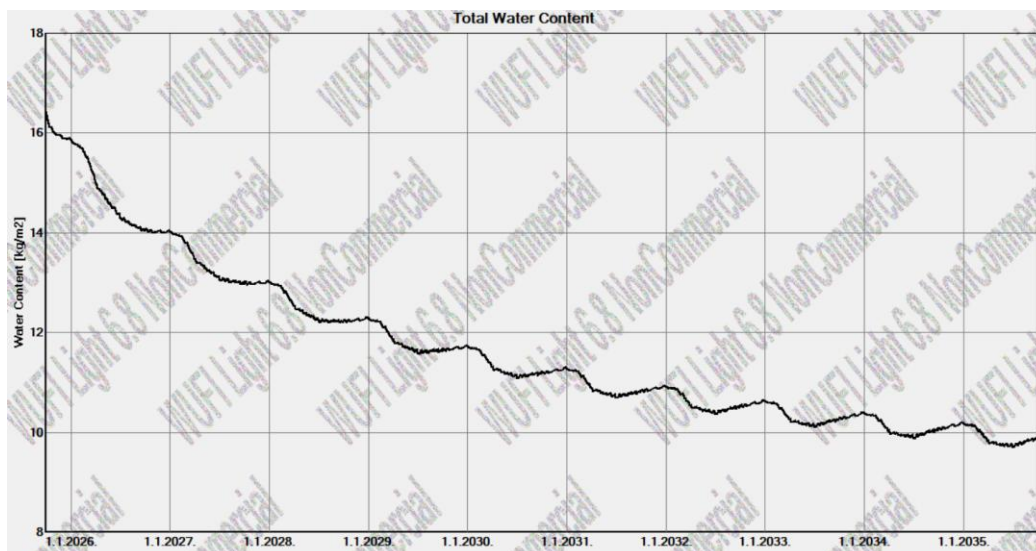
Slika 73 Odnos temperature u prvom sloju mineralne vune i temperature rosišta

U prvom sloju mineralne vune je temperatura u sloju veća od temperature rosišta što znači da neće doći do kondenzacije.

#### 6.1.3.2. Presjek kosog krova kroz rog

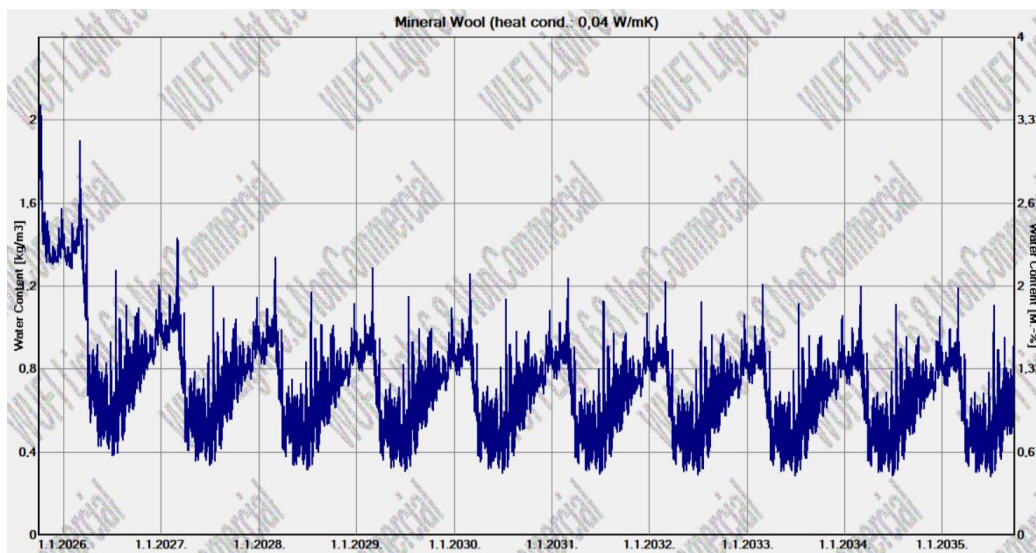
Initial Water Content in Different Layers			
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Solid Brick Masonry	0.015	18,0
2	Air Layer 50 mm	0.05	1,88
3	LDS 0.04	0.001	0,0
4	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.08	1,79
5	Hardwood	0.16	98,0
6	BARRIER NET SD40	0.001	0,0
7	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.08	1,79
8	Gypsum Board (USA)	0.025	6,19

Slika 74 Odabrani slojevi za presjek kosog krova kroz rog

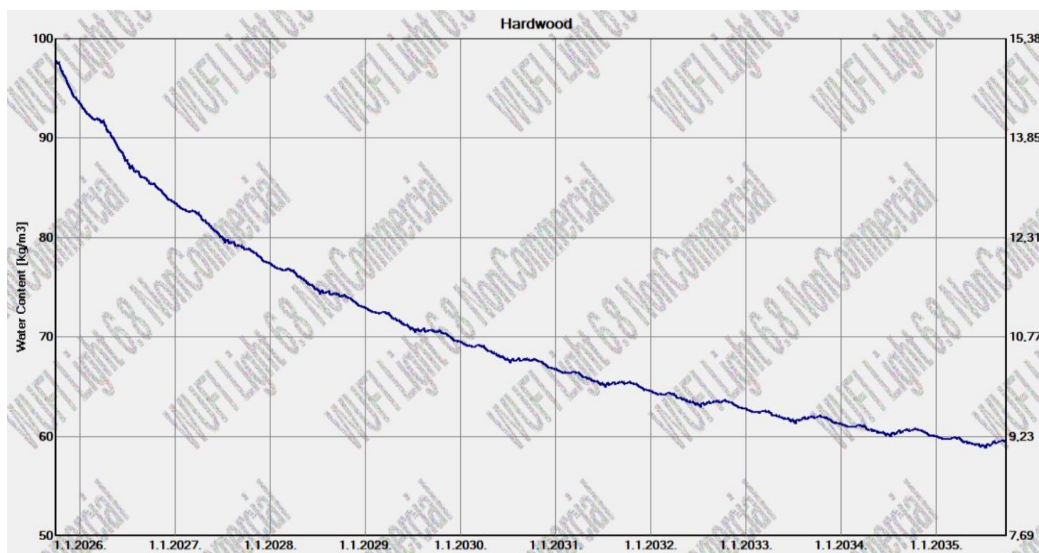


Slika 75 Ukupni sadržaj vlage u presjeku krova kroz rog

Kod presjeka ravnog krova kroz rog dolazi do postupnog opadanja ukupne količine vlage u sloju krova.

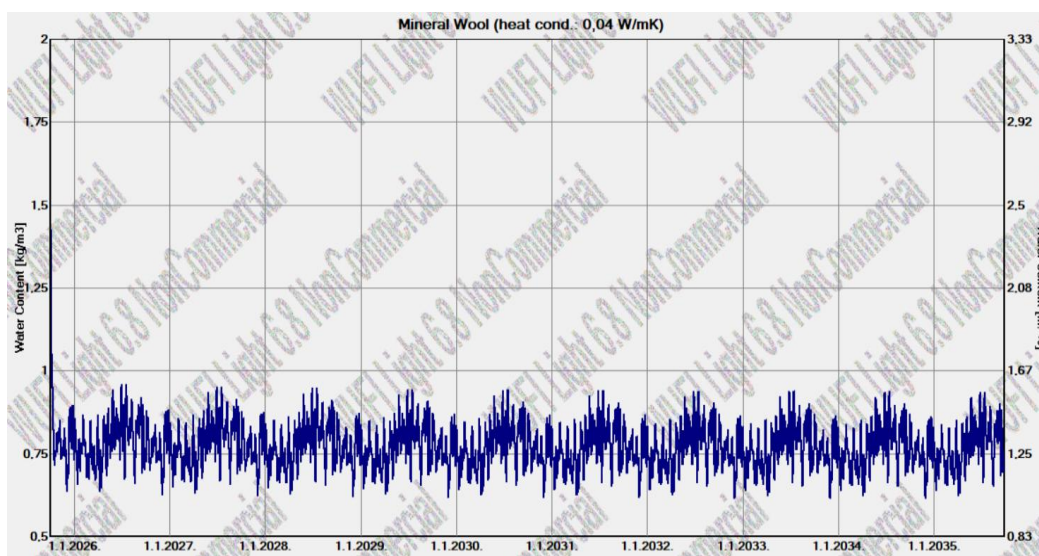


Slika 76 Ukupna količina vlage u posljednjem sloju mineralne vune



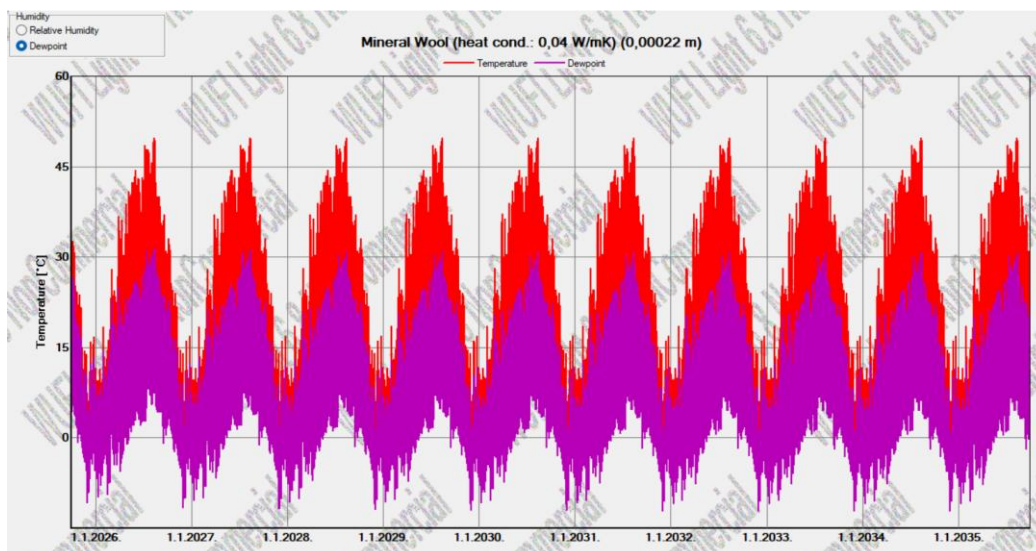
Slika 77 Ukupna količina vlage u rogu

Tijekom desetogodišnjeg razdoblja količina vlage u rogu se smanjuje.



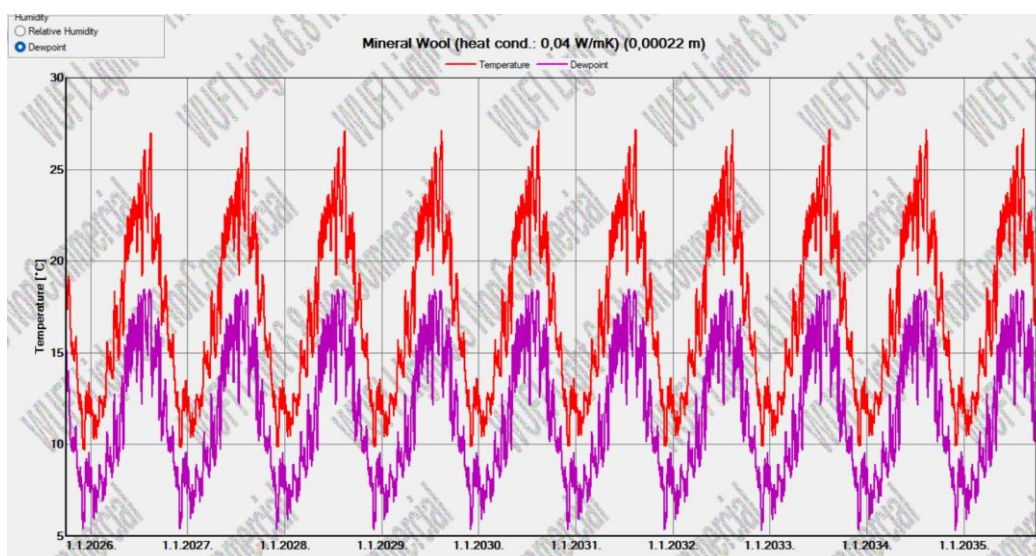
Slika 78 Ukupna količina vlage na dodiru mineralne vune i parne brane

Na dodirnoj se točki parne brane i mineralne vune uspostavlja dinamička ravnoteža.

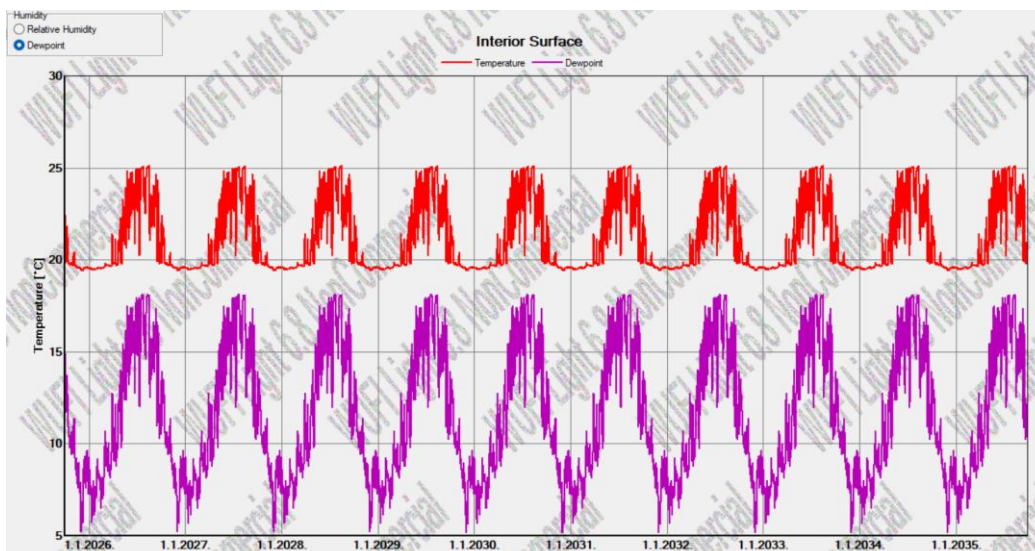


Slika 79 Prikaz temperature u sloju mineralne vune i temperature rosišta

U posljednjem se sloju mineralne vune događa dinamička ravnoteža.

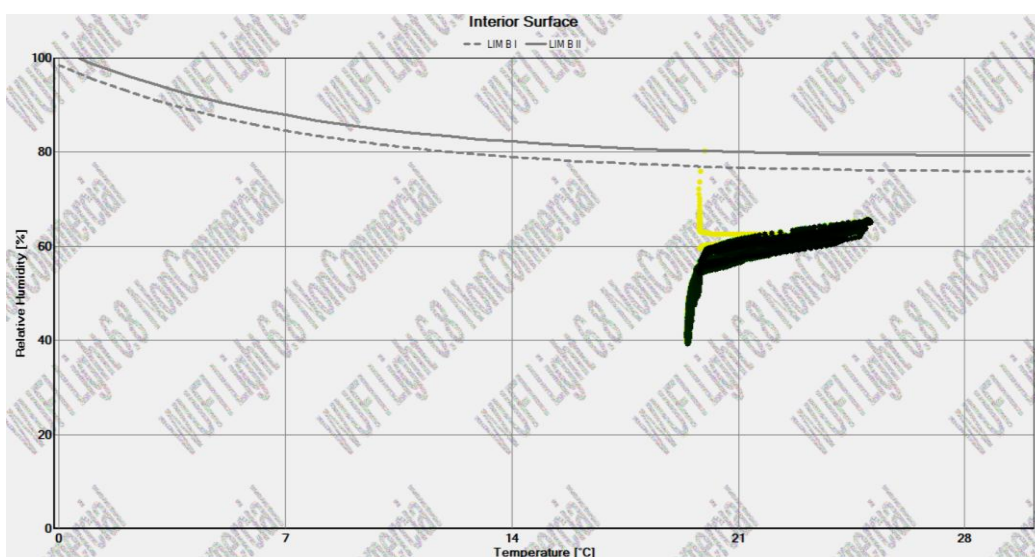


Slika 80 Prikaz temperature u prvom sloju mineralne vune i temperature rosišta



Slika 81 Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i roga i temperature rosišta

Temperatura na dodiru mineralne vune i roga, između kojih se nalazi parna brana u cijelom je razdoblju veća od temperature rosišta, što znači da nema opasnosti od kondenzacije.



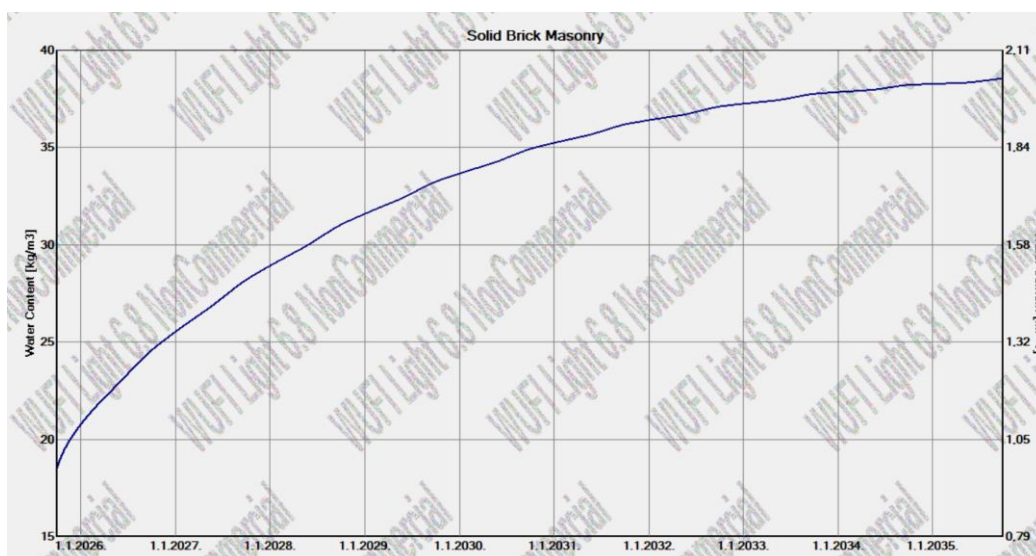
Slika 82 Izoplete na unutrašnjoj strani krova

Budući da izoplete ne prelaze granične vrijednosti, unutrašnja je površina krova sigurna od kondenzacije.

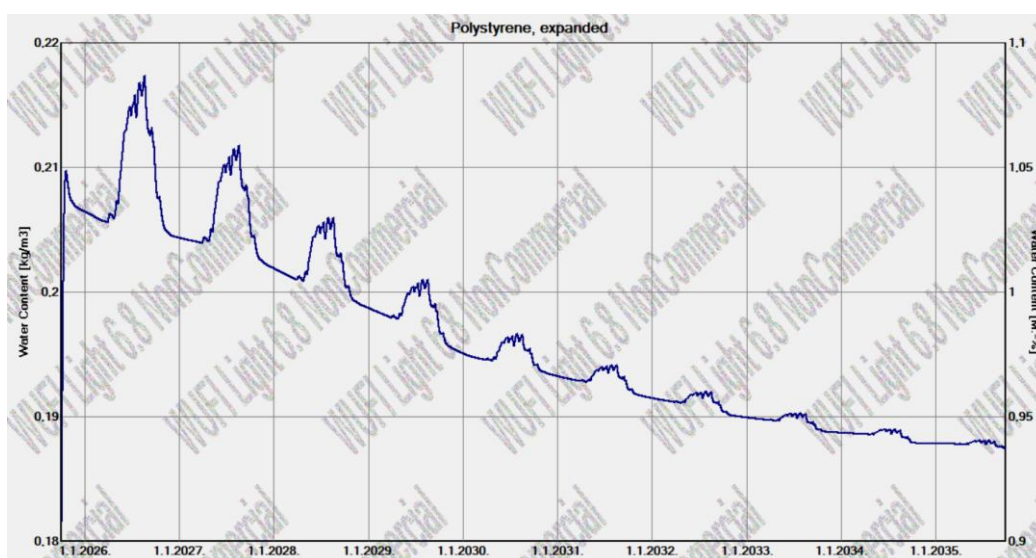
#### 6.1.4. Zid u podrumu na granici grijano-tlo

Podrumski zid u ovom području razrađen je u dva različita rješenja. U prvom slučaju, kao toplinska izolacija, odabrana izolacija od granula ekspaniranog polistirena, koja je postavljena između dva sloja zidanog zida. S obzirom na to da je vanjski zid potpuno nezaštićen od vlage i neizvjesno je kako će se ponašati toplinska izolacija, drugo rješenje uključuje oblaganje zida s unutarnje strane hidroizolacijskim slojem, nakon čega slijedi postava toplinske izolacije od mineralne vune.

#### 6.1.5. Podrumski zid – prvi slučaj

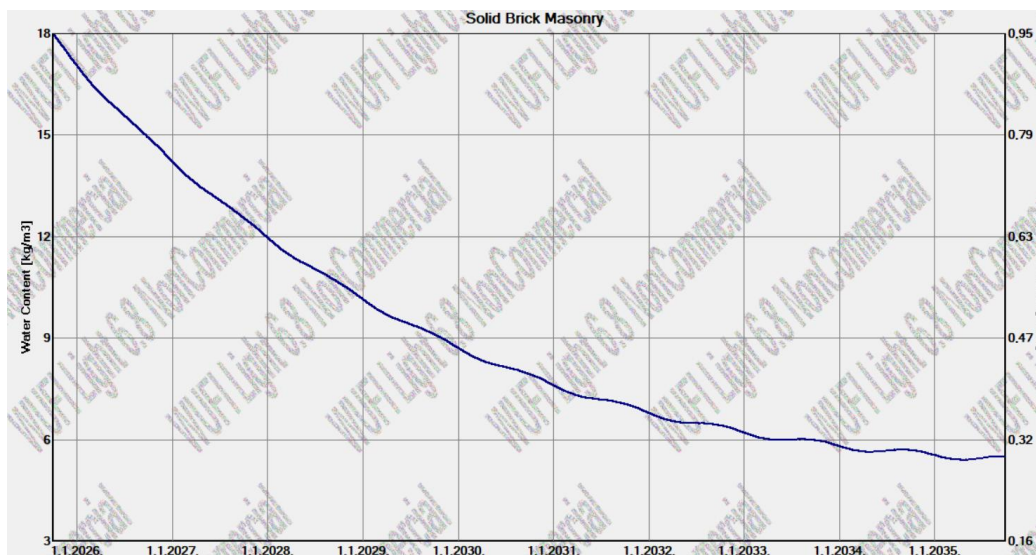


Slika 83 Ukupna količina vlage u podrumskom zidu – prvi slučaj

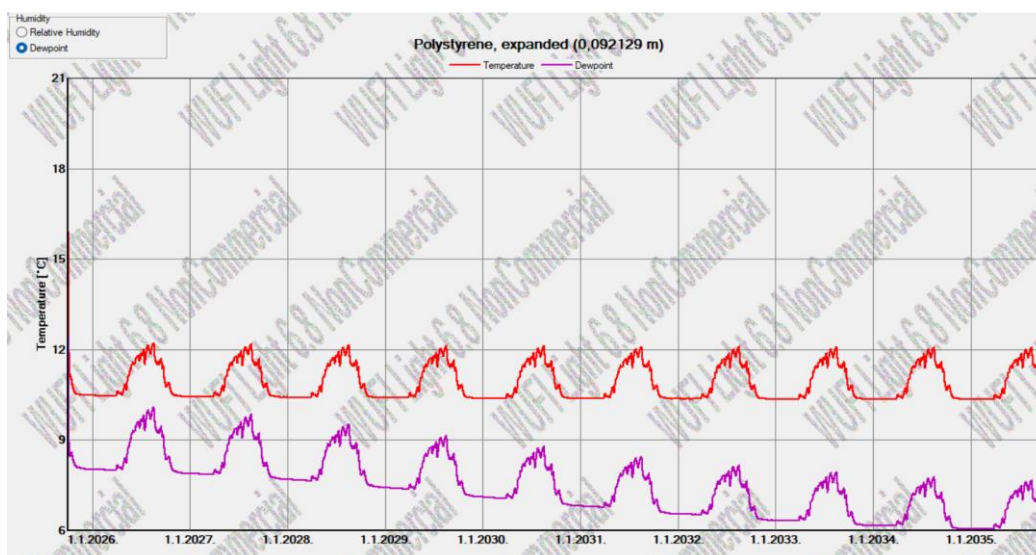


Slika 84 Ukupna količina vlage u sloju ekspaniranog polistirena

U sloju ekspaniranog polistirena u početnoj se fazi povećava količina vlage, dok se kroz cijeli proračunski vijek postupno smanjuje. Prema rezultatima, dolazi do sušenja što znači da je toplinska izolacija od granula ekspaniranog polistirena dobro rješenje.

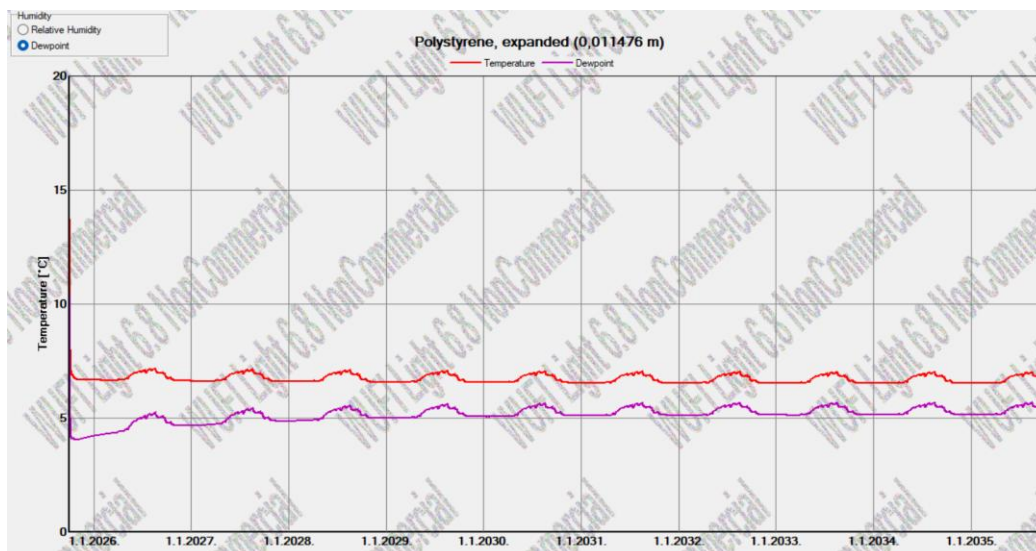


Slika 85 Ukupna količina vlage u unutrašnjem zidu



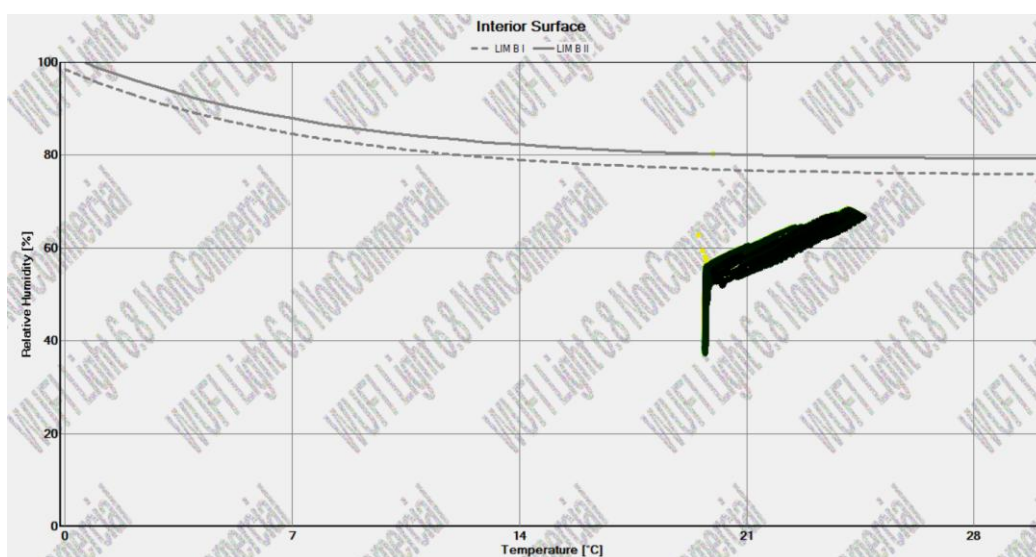
Slika 86 Prikaz temperature na dodiru vanjskog zida i toplinske izolacije i temperature rosišta





Slika 87 Prikaz temperature na dodiru toplinske izolacije i vanjskog zida i temperature rosišta

Na dodirima toplinske izolacije sa zidovima, temperatura je veća od temperature rosišta što znači da neće doći do kondenzacije.



Slika 88 Prikaz higrotermalnih uvjeta na unutarnjoj strani zida u podrumu

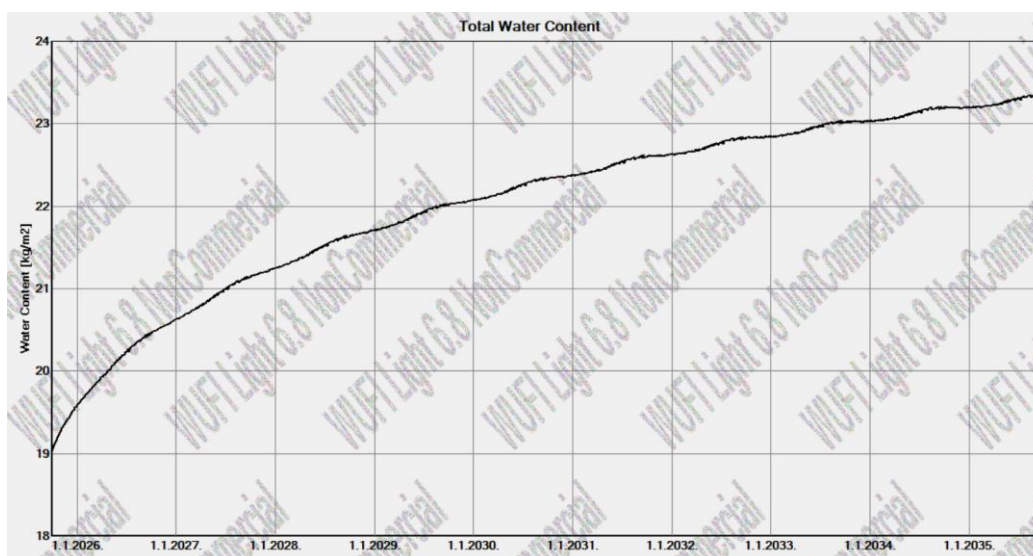
I u ovom slučaju higrotermalni uvjeti ne prelaze granične vrijednosti te nema opasnosti od gljivica i plijesni.

Unatoč sumnjama u mogućnost pojave kondenzacije, proračun pokazuje da je toplinska izolacija od granula ekspaniranog polistirena povoljno rješenje. Za usporedbu će se provesti i proračun drugog rješenja.

#### 6.1.6. Podrumski zid – drugi slučaj

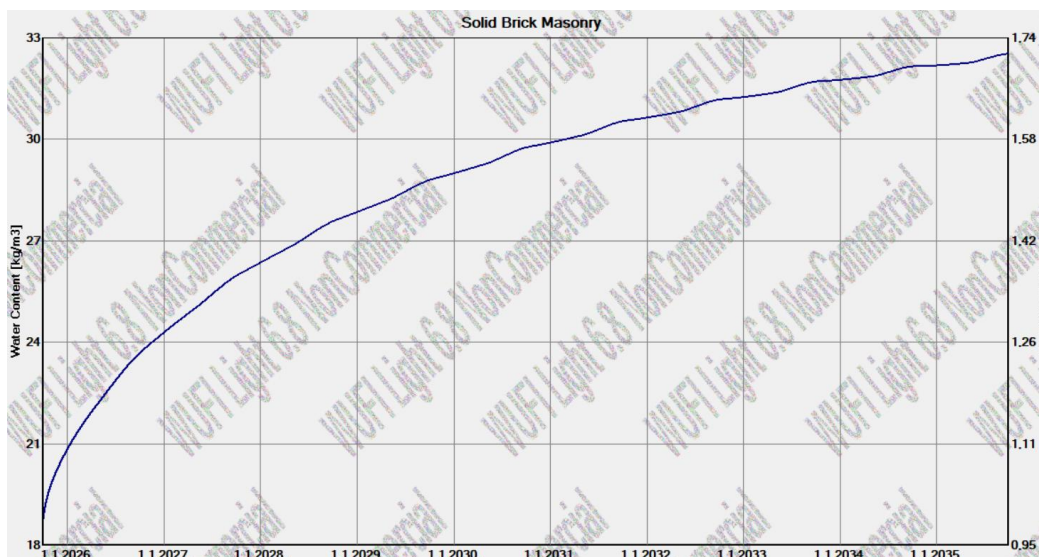
Initial Water Content in Different Layers			
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Solid Brick Masonry	0.4	18,0
2	Air Layer 100 mm	0.25	1,88
3	Solid Brick Masonry	0.6	18,0
4	Bituminous Paper (#15 Felt)	0.003	0,0
5	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0.1	1,79
6	LDS 10	0.002	0,0
7	Gypsum Board (USA)	0.025	6,19

Slika 89 Odabrani slojevi za drugi slučaj zida

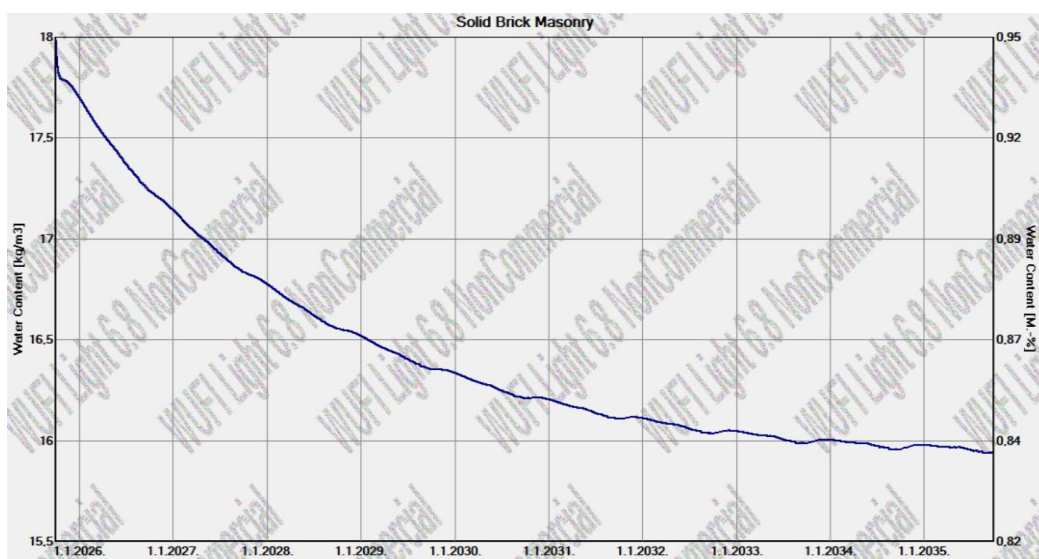


Slika 90 Ukupna količina vlage u podrumskom zidu

Zbog nepristupačnosti vanjske površine zida, nije moguće izvesti hidroizolaciju s vanjske strane zbog čega se ukupna količina vlage povećava kroz 10-godišnje razdoblje.

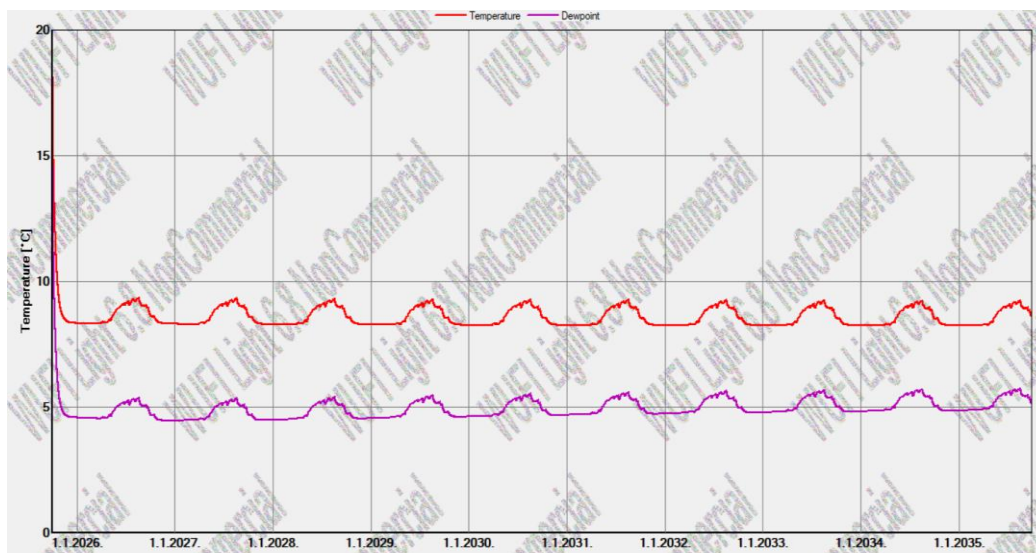


Slika 91 Ukupna količina vlage u vanjskom zidu



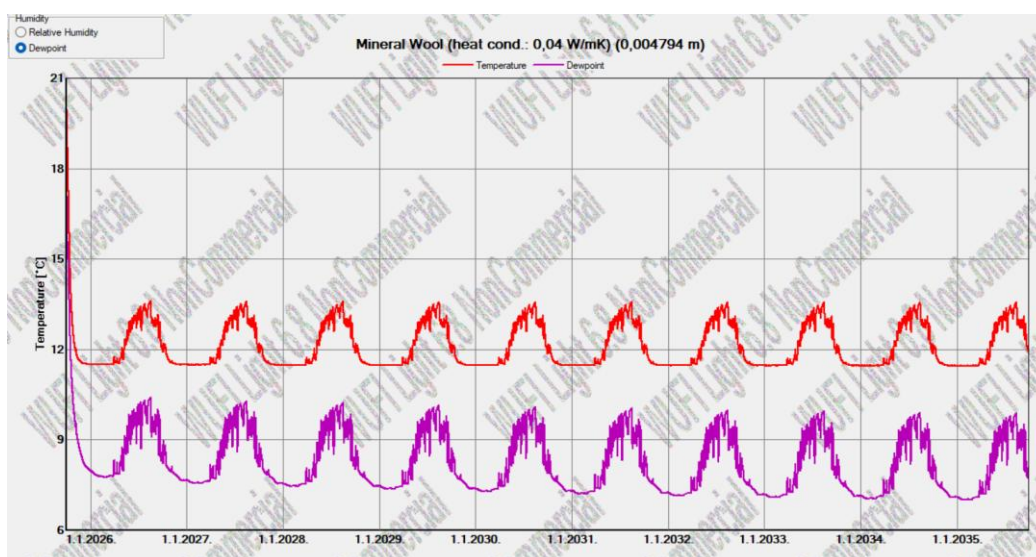
Slika 92 Ukupna količina vlage u unutrašnjem zidu

U unutrašnjem se zidu smanjuje ukupna količina vlage, što je povoljno za naš zid i znači da se unutarnji zid suši.



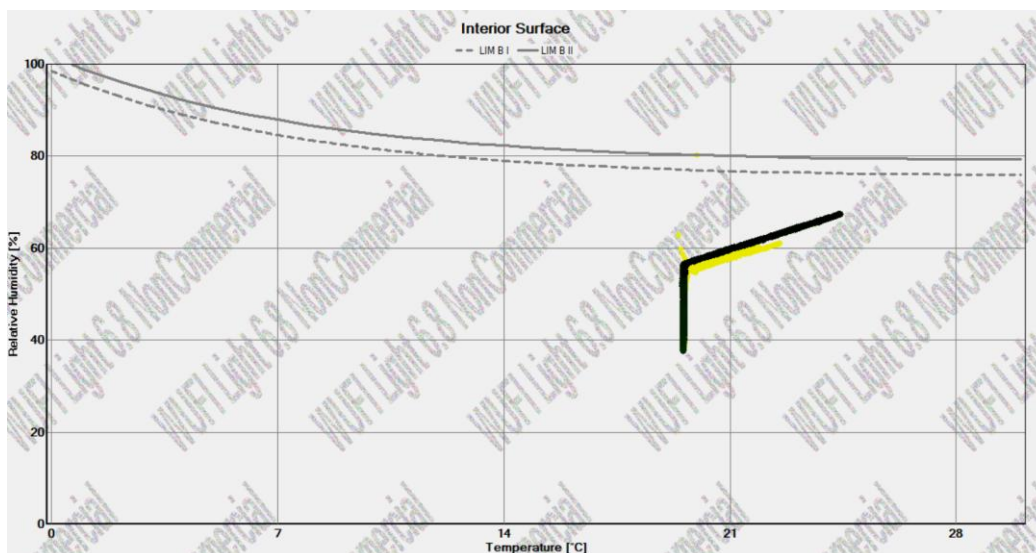
Slika 93 Prikaz temperature u unutrašnjem zidu i temperature rosišta

Rezultati prikazuju temperature u zidu veću od temperature rosišta, dakle ne dolazi do kondenzacije.



Slika 94 Prikaz temperature na kontaktnoj površini mineralne vune i temperature rosišta

Kod unutrašnje je izolacije obično kritično područje spoj mineralne vune i hladnog zida. Prema rezultatima, u ovom slučaju nema opasnosti od kondenzacije.



Slika 95 Izoplete higrotermalnih uvjeta za unutrašnjost zid

Budući da izoplete ne prelaze granične vrijednosti, neće doći do kondenzacije vodene pare na unutrašnjosti zida.

Proračunom smo utvrdili da su oba rješenja dobra. U ovom je radu uzet u obzir i proračun CO<sub>2</sub>, pa će zbog pozitivnog utjecaja ovčje vune na emisiju CO<sub>2</sub> u konačnici biti odabrano drugo rješenje.

## 7. PRORAČUN EMISIJE CO<sub>2</sub> PLINOVA

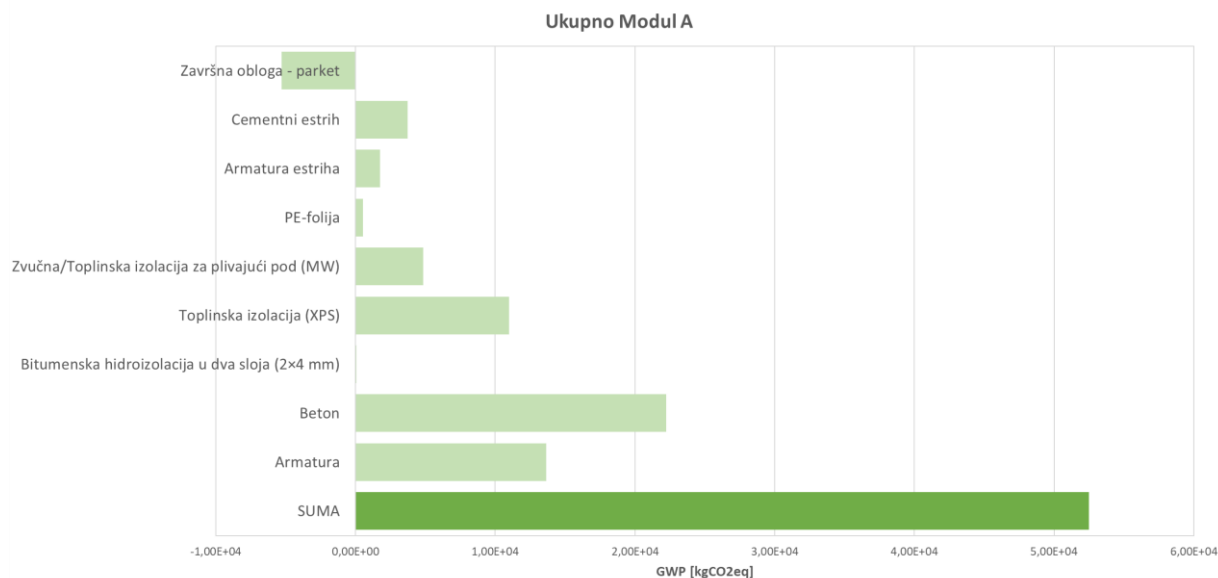
Napravljen je proračun emisije CO<sub>2</sub> plinova tijekom cjelokupnog životnog vijeka zgrade, prema takozvanom modelu "od kolijevke pa do groba". Navedeni model obuhvaća sve faze počevši od vađenja sirovina, proizvodnje materijala, transporta, ugradnje, održavanja pa sve do uklanjanja. Faza A uključuje fazu proizvoda i akcijske primjene, faza B podrazumijeva operativnu fazu, faza C je faza kraja uporabnog vijeka, dok faza D uključuje prednosti i teret izvan sustava. [17]

Tablica 55 Faze uporabnog vijeka građevine [17]

A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
Faza proizvoda	Faza akcijske primjene	Operativna faza	Faza kraja uporabnog vijeka	Prednosti i teret izvan sustava
A1 – Vađenje sirovina A2 – Prijevoz A3 – Proizvodnja	A4 – Prijevoz do gradilišta A5 – Ugradnja	B1 – Upotreba B2 – Održavanje B3 – Popravak B4 – Zamjena B5 – Obnova B6 – Potrošnja energije (operativna) B7 – Potrošnja vode (operativna)	C1 – Rušenje C2 – Prijevoz C3 – Procesuiranje otpada C4 – Odlaganje otpada	Ponovna upotreba / obnova / recikliranje

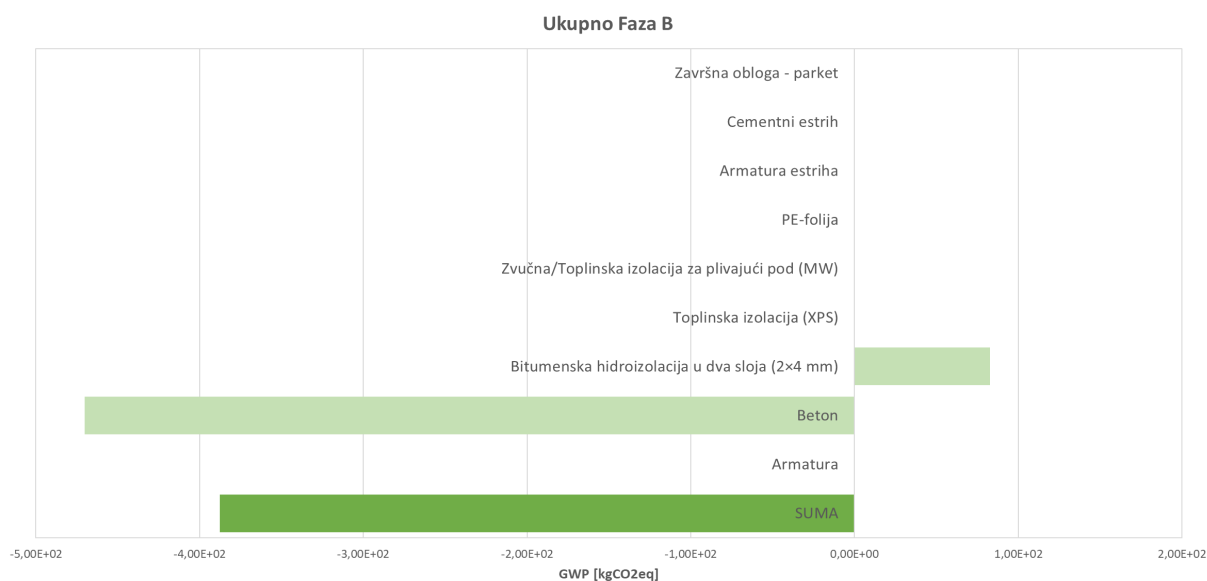
Svaka faza životnog ciklusa građevine ima svoju vrijednost potencijala globalnog zatopljenja (GWP). GWP vrijednosti izvađene su iz Ekoloških deklaracija o proizvodu (EPD -ova). Oni u građevinskoj industriji omogućuju bolje razumijevanje karakteristika materijala i njihovih utjecaja na okoliš. [17]

## 7.1. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za pod na tlu



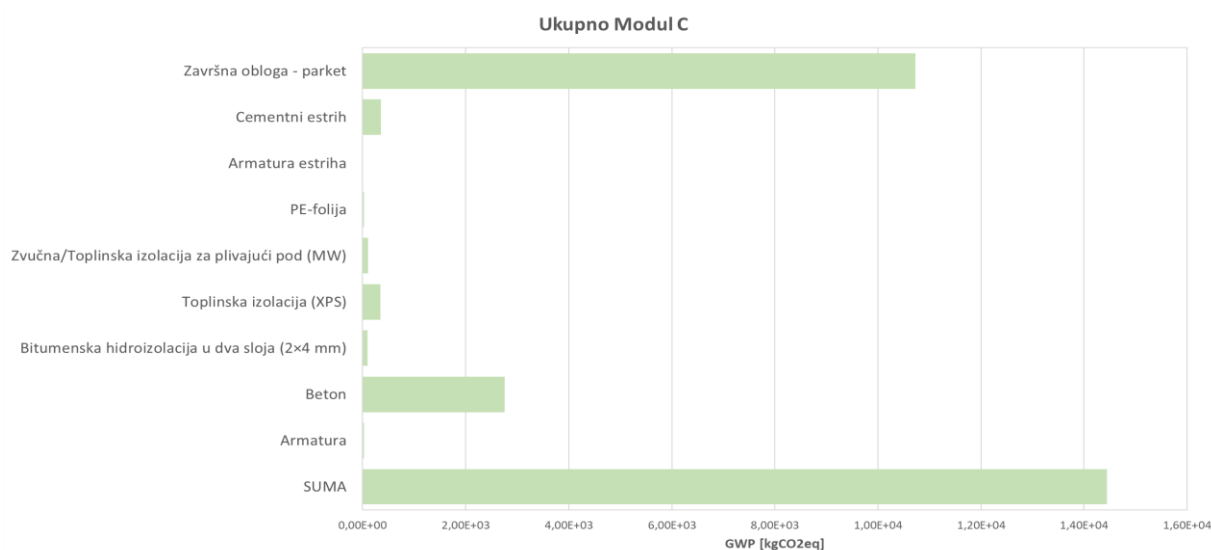
Slika 96 GWP vrijednosti modula A – Pod na tlu

Prema rezultatima, najveća emisija CO<sub>2</sub> u prvoj fazi javlja se kod betona i armature, dok u slučaju parketa imamo apsorpciju CO<sub>2</sub>. U sumi to daje vrijednost od 52 500 kg CO<sub>2</sub>.



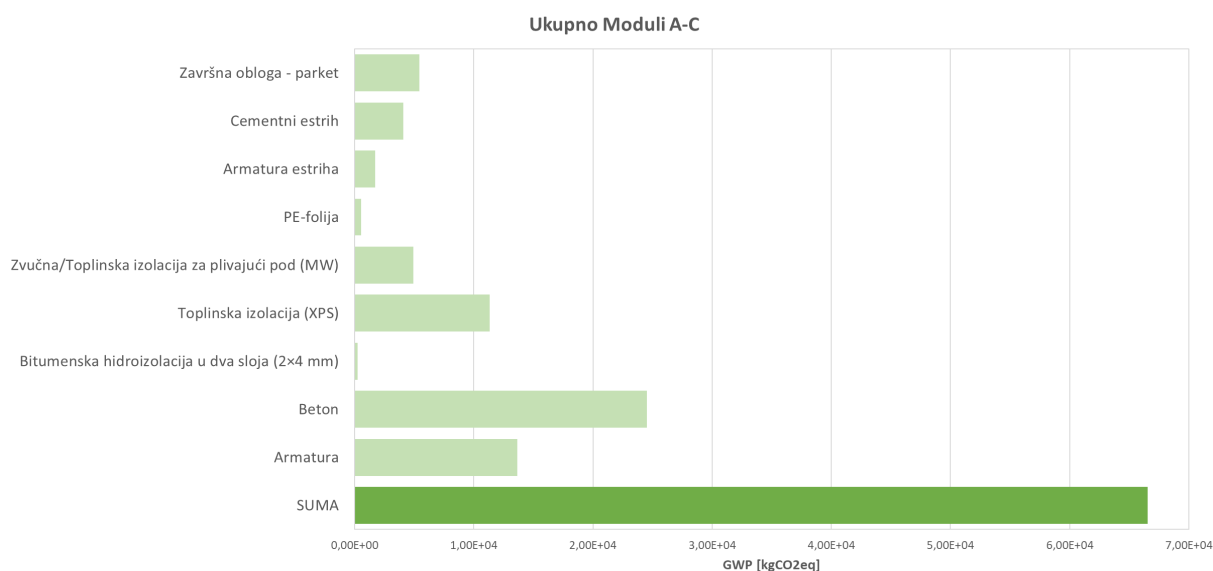
Slika 97 GWP vrijednosti modula B – Pod na tlu

U fazi B, koja osim same uporabe uključuje održavanje, popravke, zamjenu i uporabu energije i vode tijekom rada, dolazi do negativnih vrijednosti GWP- a betona. Ova se pojava događa zbog karbonatizacije. [23]



Slika 98 GWP vrijednosti modula C– Pod na tlu

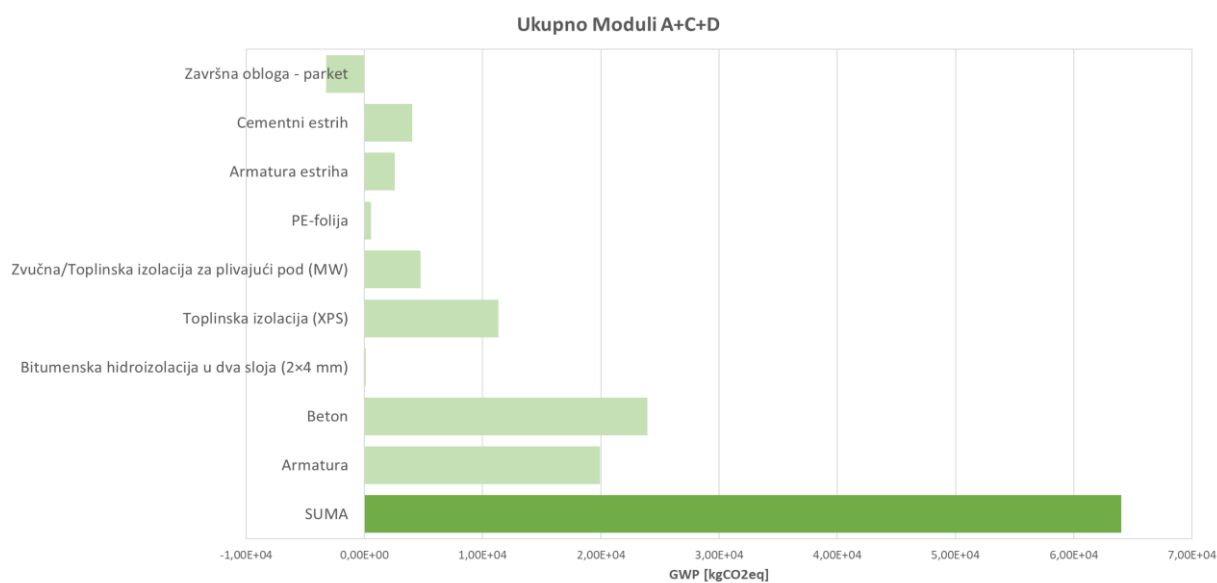
Na kraju životnog ciklusa poda na tlu dolazi do najveće emisije u slučaju parketa.



Slika 99 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za pod na tlu



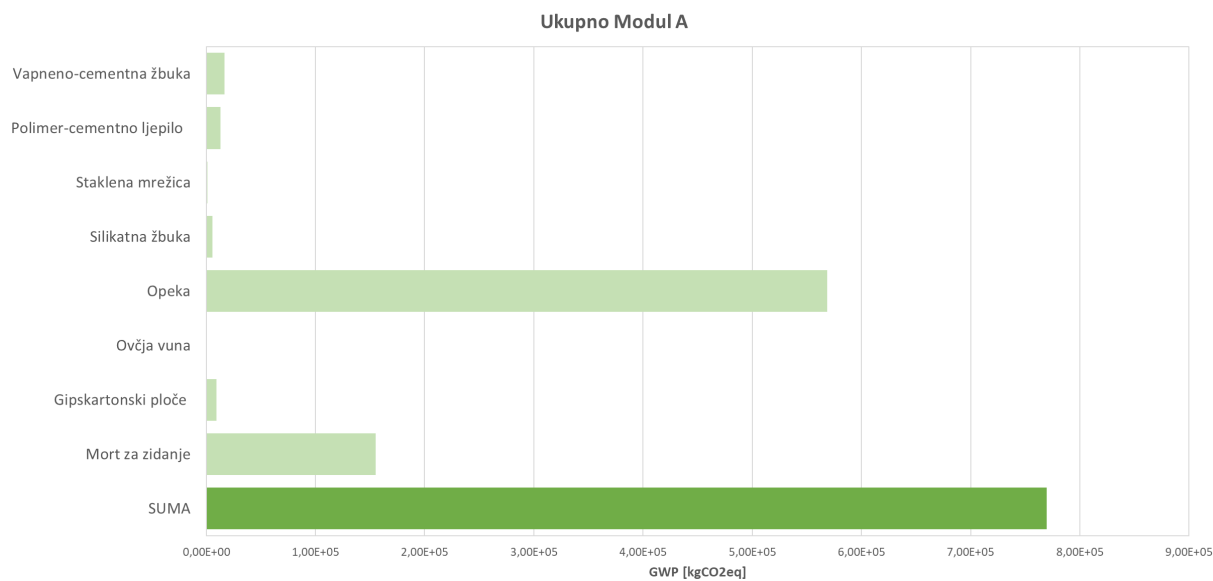
Faza kraja životnog ciklusa obuhvaća emisije povezane s demontažom, transportom, obradom otpada i odlaganjem proizvoda nakon njegove uporabe. Najveće se vrijednosti javljaju kod betona, armature i XPS-a, a suma svih vrijednosti iznosi 66.000 kgCO<sub>2</sub>eq.



Slika 100 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za pod na tlu

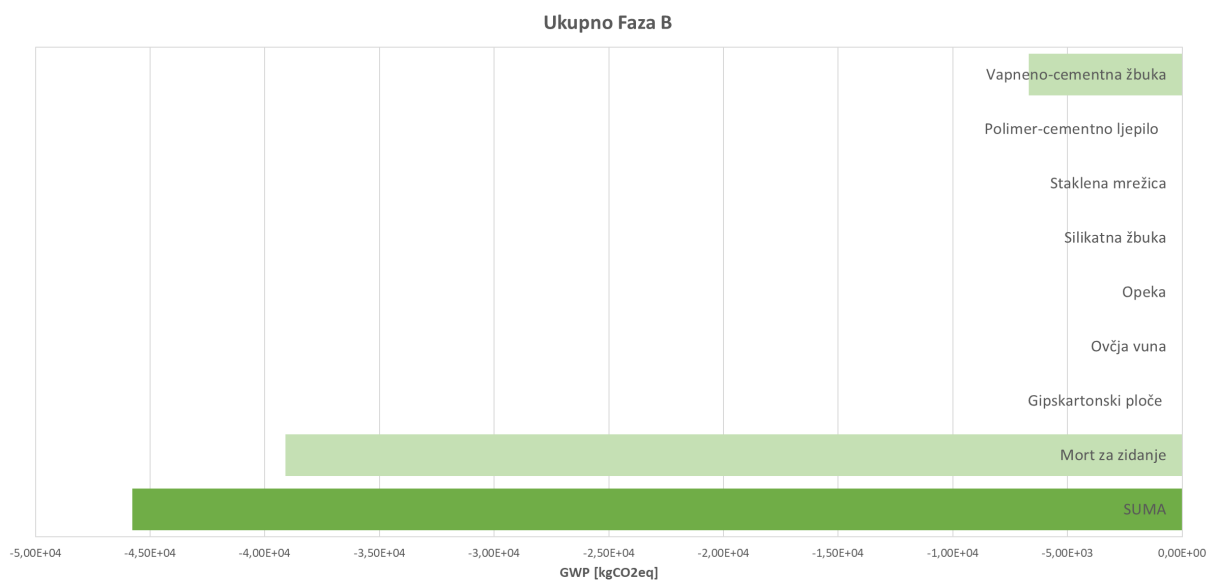
Ako u obzir uzmemo faze A, C i D, najveća je promjena vidljiva u slučaju parketa gdje dolazi do negativnih vrijednosti GWP-a. Ukupna emisija iznosi 64 000 kgCO<sub>2</sub>eq.

## 7.2. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za vanjske zidove



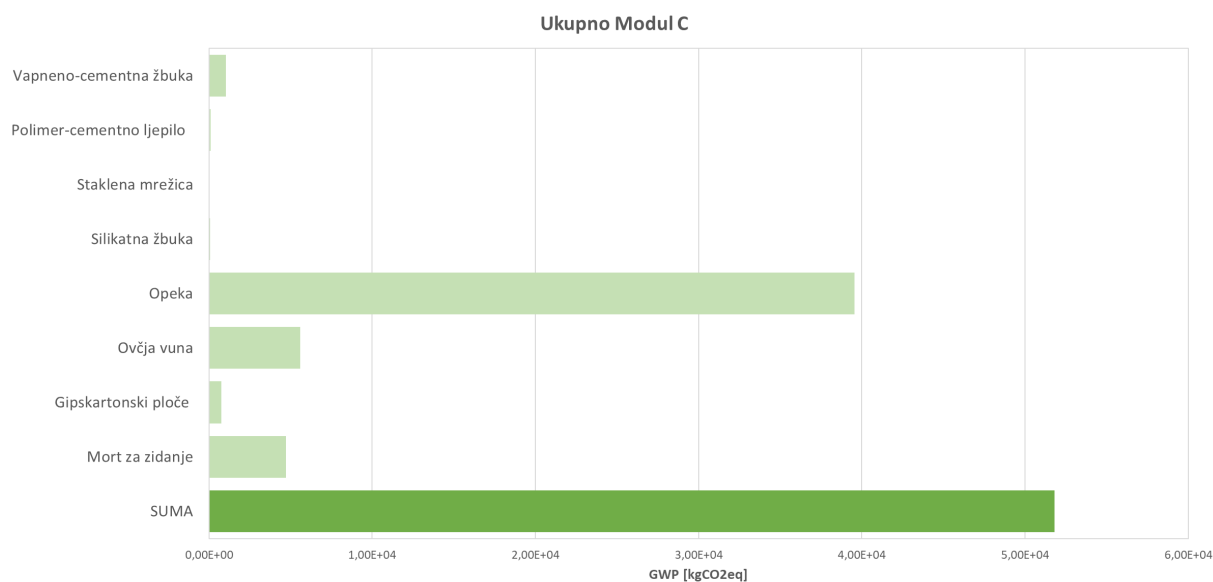
Slika 101 GWP vrijednosti modula A – Vanjski zidovi

Modul A daje najveće vrijednosti GWP-a u slučaju opeke i morta za zidanje. Rezultat se djelomično može objasniti činjenicom da najveći volumen zauzimaju upravo te stavke.

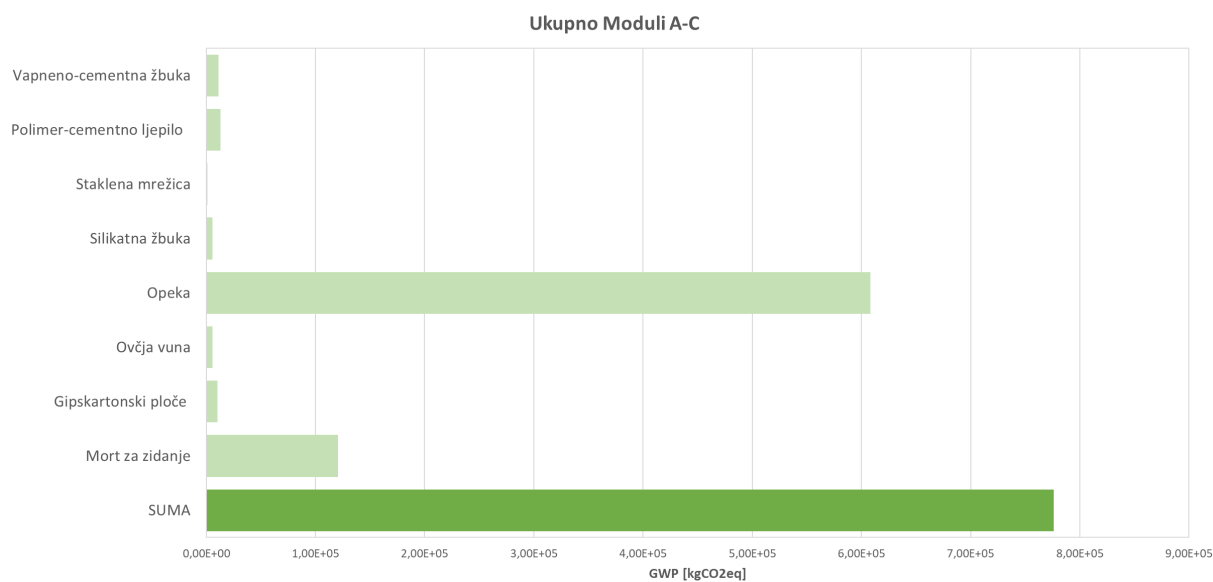


Slika 102 GWP vrijednosti modula B – Vanjski zidovi

U fazi korištenja dolazi do negativnih vrijednosti u mortu i vapneno- cementnoj žbuci zbog ranije spomenute karbonatizacije.

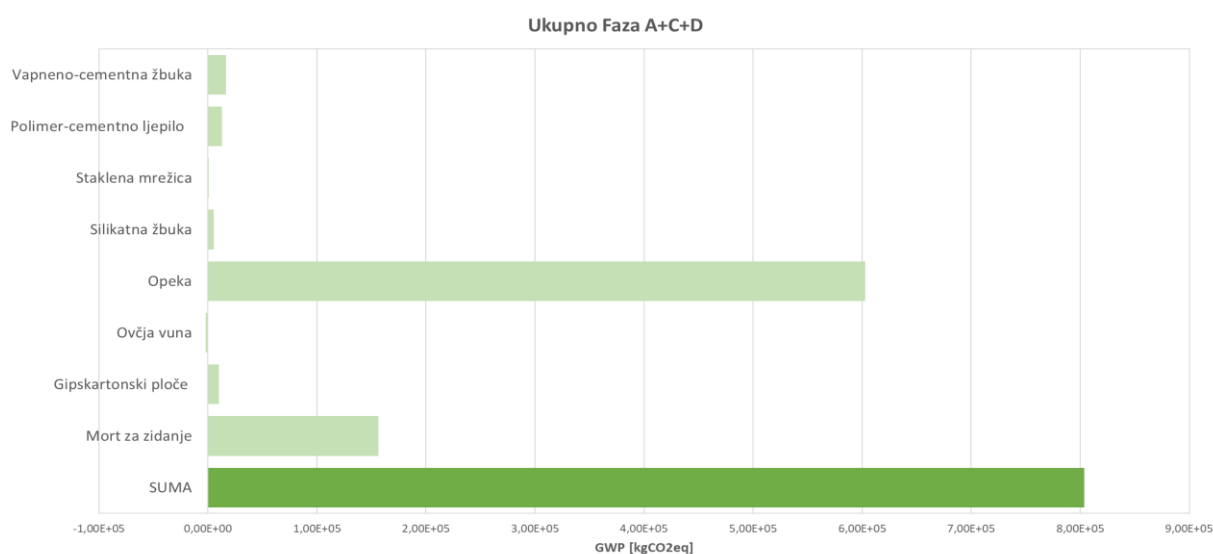


Slika 103 GWP vrijednosti modula C – Vanjski zidovi



Slika 104 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za vanjske zidove

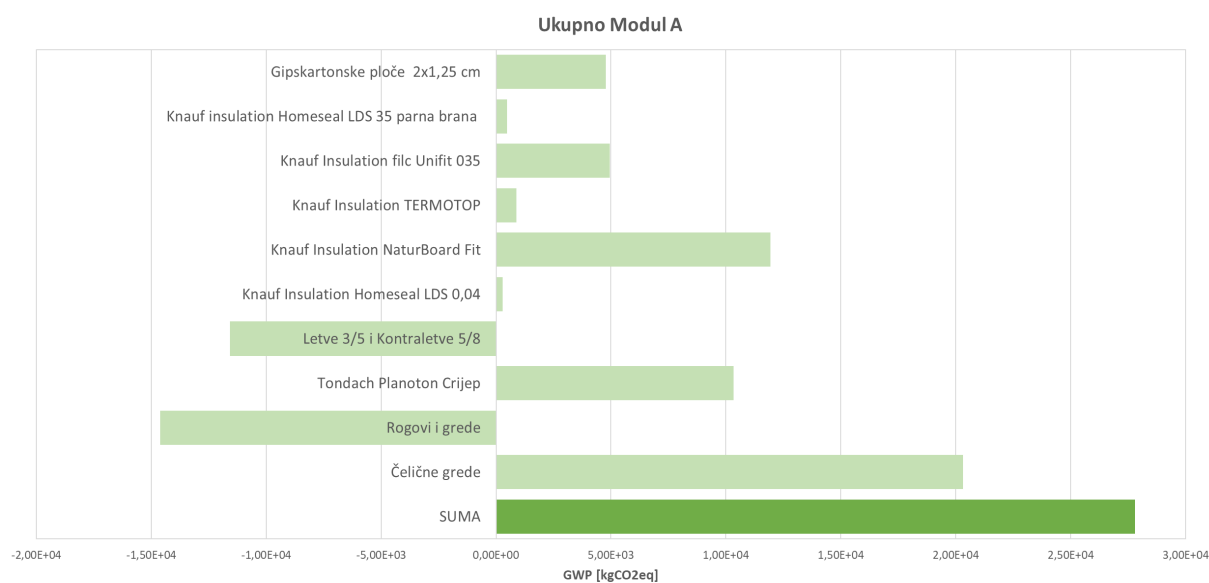
Prema rezultatima proračuna u sumi modula A-C, najveća se emisija CO<sub>2</sub> događa kod opeke i morta za zidanje, što daje ukupnu emisiju od 776 000 kgCO<sub>2</sub>eq .



Slika 105 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za vanjske zidove

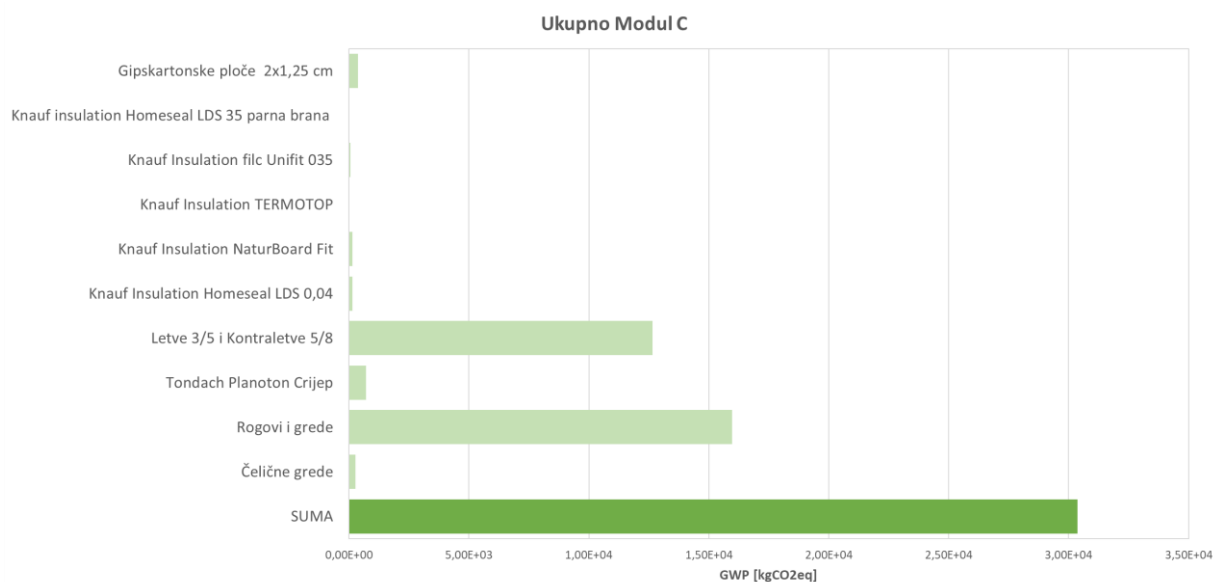
Kada životnom vijeku materijala za građenje dodamo fazu D koja označuje ponovnu upotrebu, odnosno recikliranje, emisija CO<sub>2</sub> se smanjuje. Kod ovčje vune, GWP vrijednost prelazi u negativno što znači da dolazi do apsorpiranja CO<sub>2</sub>. Ukupni iznos emisije u ovom je slučaju 804.000 kgCO<sub>2</sub>eq.

### 7.3. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za kosi krov



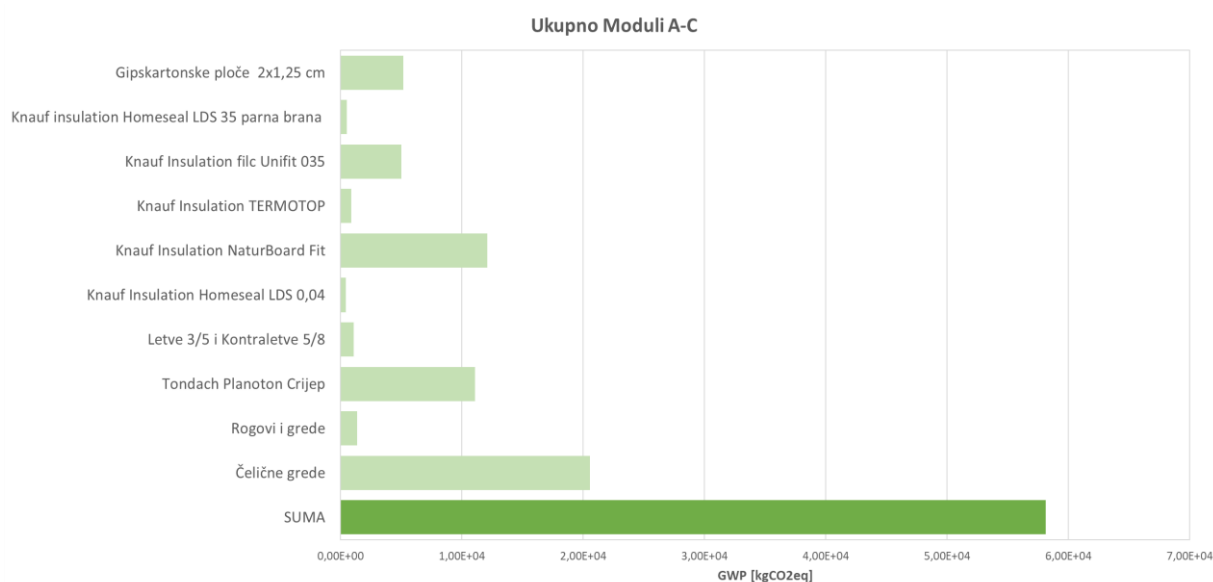
Slika 106 GWP vrijednosti modula B – Kosi krov

U fazi A dolazi do najvećih emisija CO<sub>2</sub> kod čeličnih greda, crijepa i mineralne vune, dok se u drvenim materijalima javlja apsorpcija. U fazi B ne dolazi do emisija.



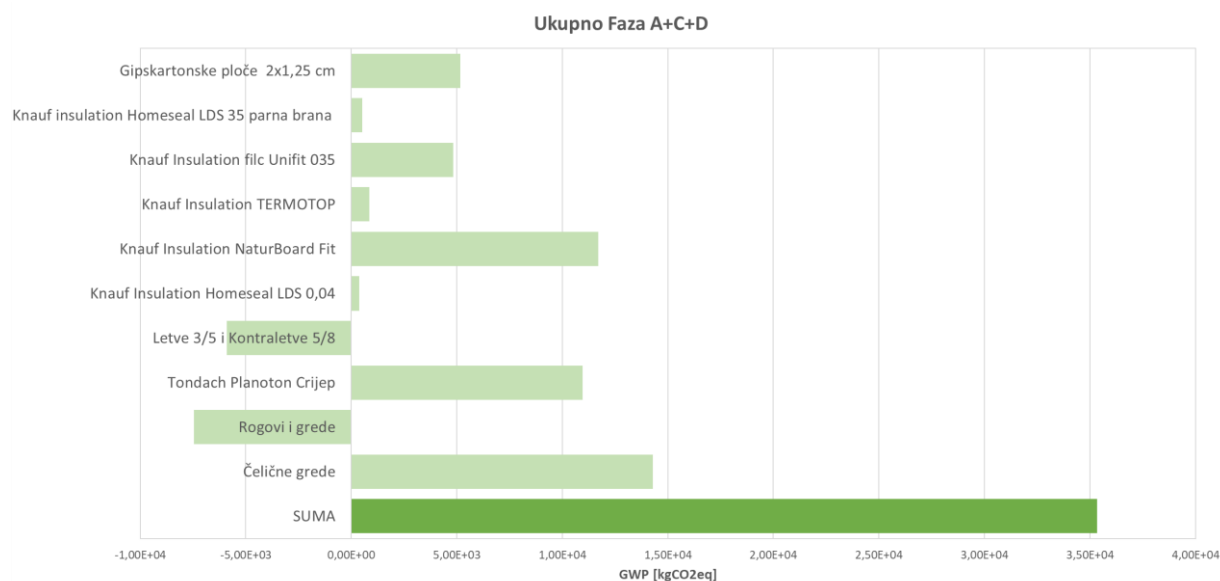
Slika 107 GWP vrijednosti modula C – Kosi krov

Kod završne faze životnog ciklusa javlja se najveća emisija u drvenim materijalima.



Slika 108 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za kosi krov.

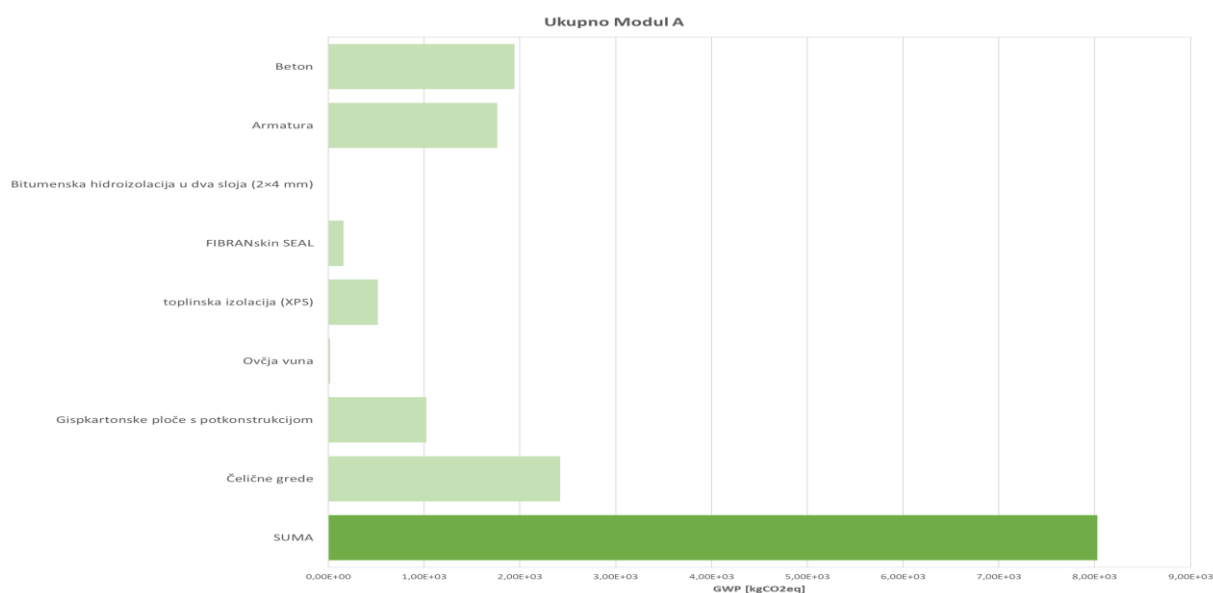
Kod kosog krova najveću emisiju CO<sub>2</sub> imaju čelične grede, crijep i mineralna vuna. Ukupna emisija za cijeli kosi krov iznosi 58.100 kgCO<sub>2</sub>.



Slika 109 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za pod kosi krov

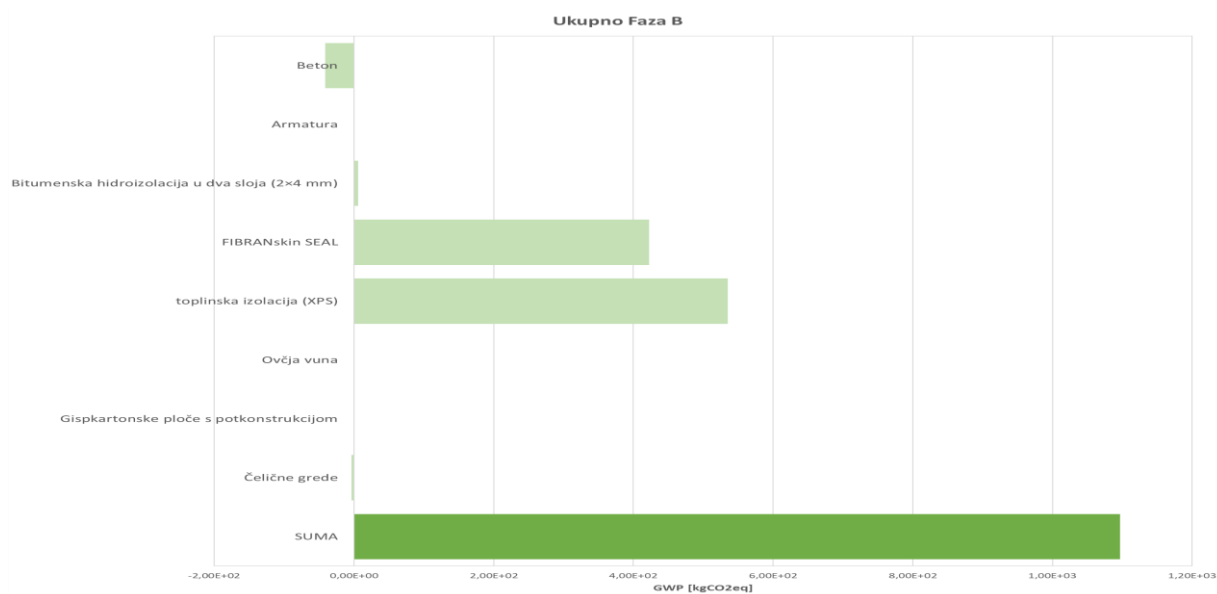
Kao što je ranije navedeno, drvo u fazi raspadanja apsorbira CO<sub>2</sub>, zbog čega kod rogova, letvi i kontra letvi imamo negativne GWP vrijednosti.

#### 7.4. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za ravni krov



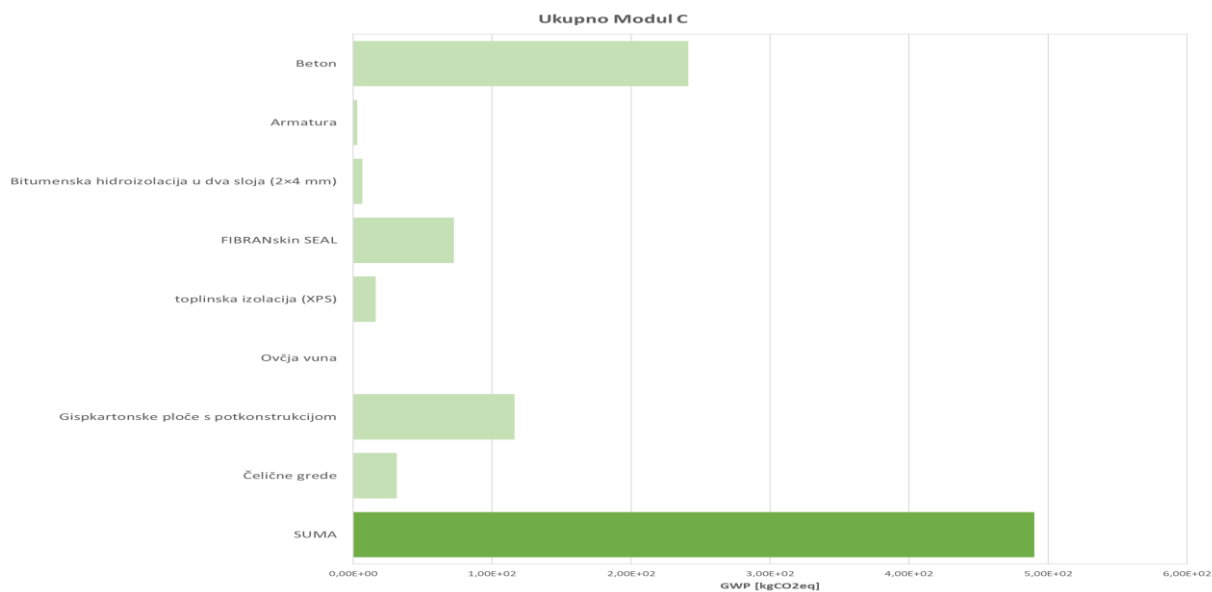
Slika 110 GWP vrijednosti modula A – Ravni krov

U slučaju ravnog krova, prvu fazu označava najveća emisija kod čeličnih greda i betona.



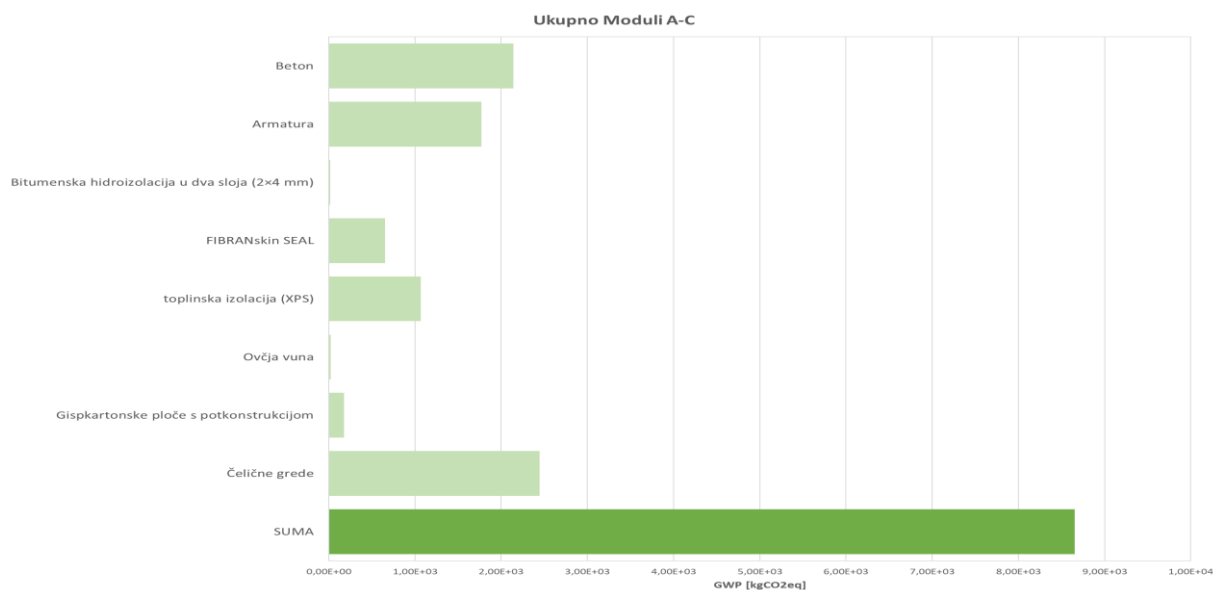
Slika 111 GWP vrijednosti modula B – Ravni krov

U fazi korištenja imamo emisiju CO<sub>2</sub> kod XPS- a i hidroizolacijskih materijala jer je njih potrebno zamijeniti, dok u betonu imamo negativnu vrijednost zbog karbonatizacije.



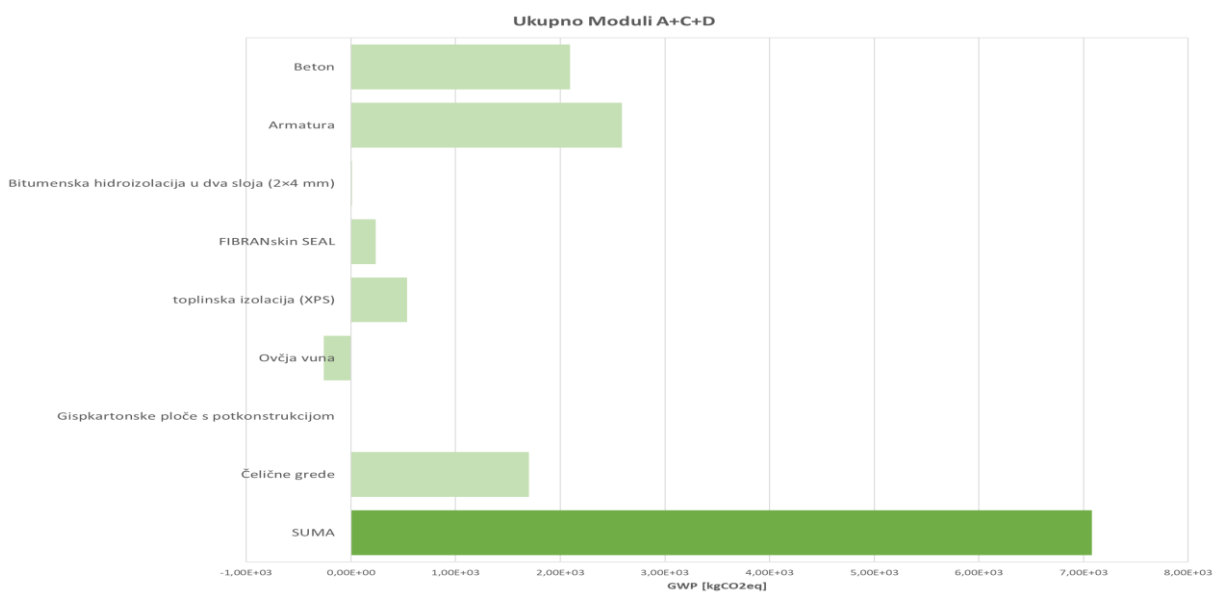
Slika 112 GWP vrijednosti modula C – Ravni krov

U posljednjoj se fazi životnog ciklusa najveće emisije javljaju u betonu i konstrukciji spuštenog stopa.



Slika 113 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za ravni krov

Kod ravnog krova najveća se emisija CO<sub>2</sub> javlja zbog betona, armature te čeličnih greda, a ukupna emisija iznosi 8.560 kgCO<sub>2</sub>.

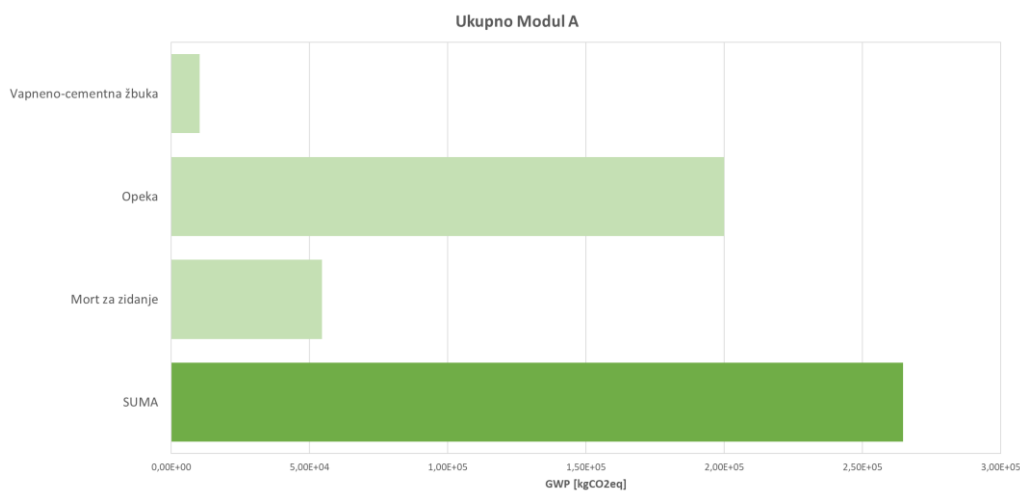


Slika 114 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za ravni krov

I u ovom se slučaju javlja apsorpcija CO<sub>2</sub> kod ovčje vune u fazi D, a zbroj faza A+C+D daje 7080 kg CO<sub>2</sub>.

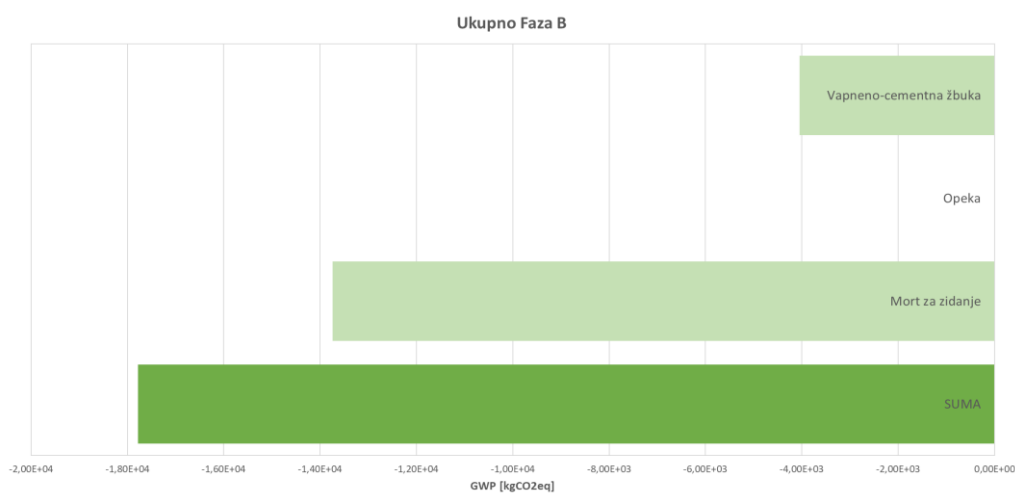


## 7.5. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za unutarnje nosive zidove



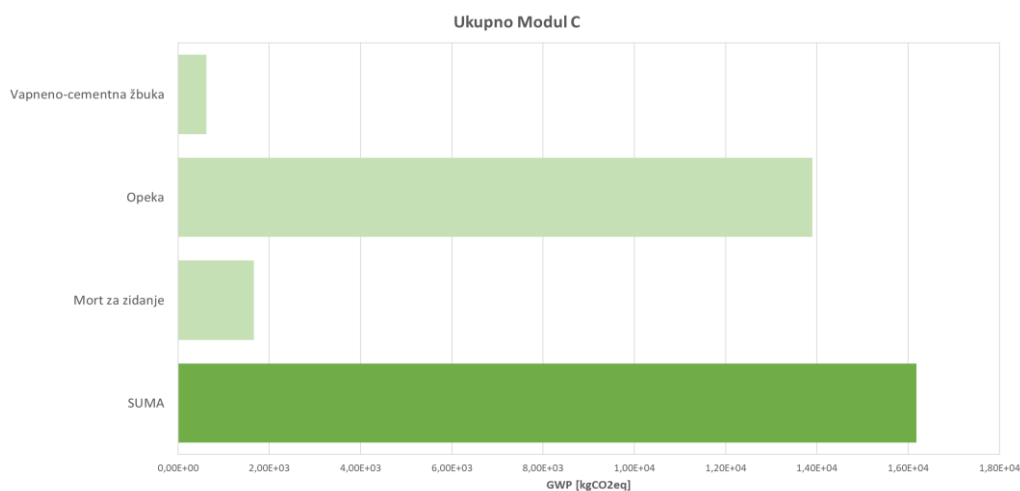
Slika 115 GWP vrijednosti modula A – Unutarnji nosivi zidovi

Kod unutarnjih nosivih zidova u fazi A dolazi do emisije CO<sub>2</sub> u svim materijalima.

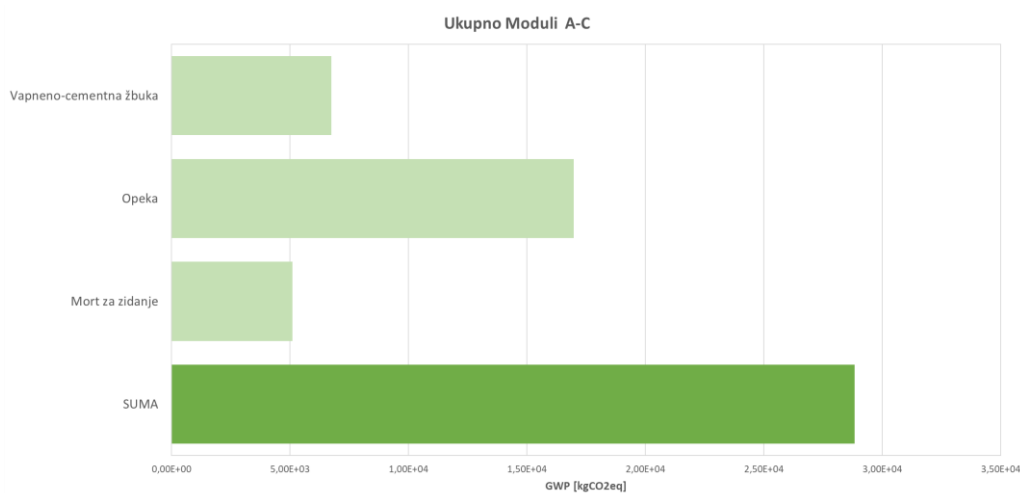


Slika 116 GWP vrijednosti modula B – Unutarnji nosivi zidovi

Zbog karbonatizacije imamo negativne vrijednosti u modulu B kod morta i vapneno-cementne žbuke.

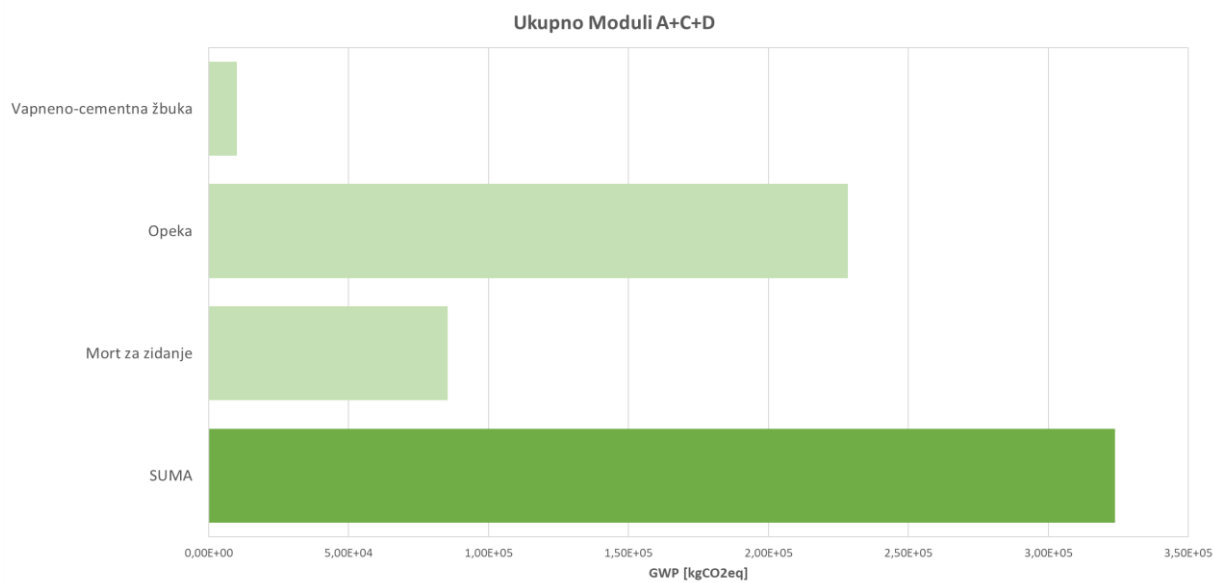


Slika 117 GWP vrijednosti modula C – Unutarnji nosivi zidovi



Slika 118 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za unutarnje nosive zidove

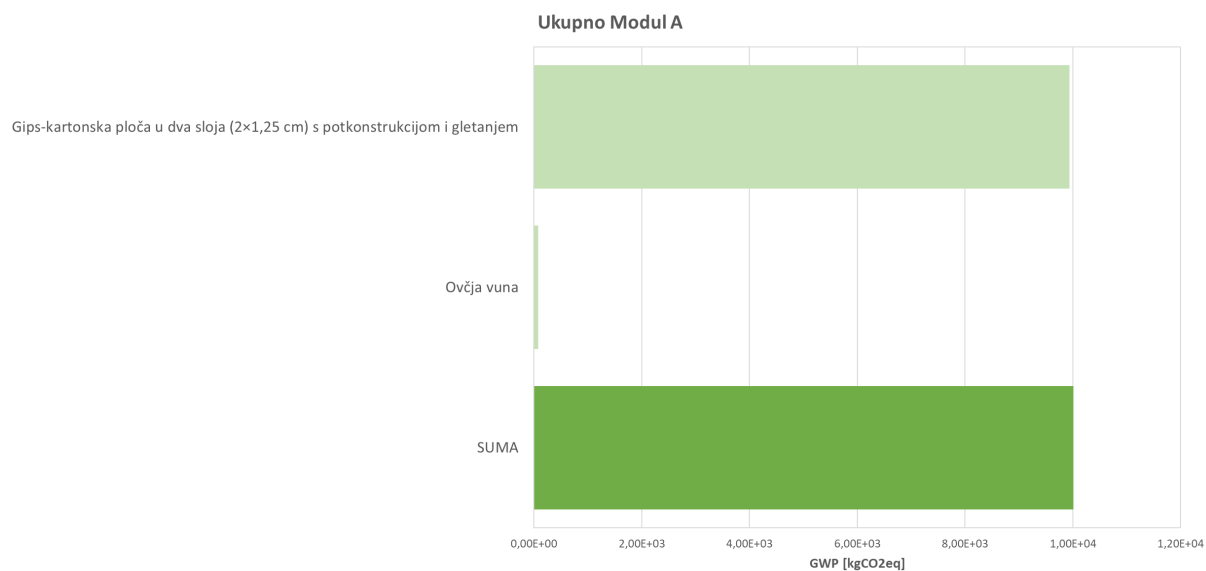
Ukupna vrijednost emisije CO<sub>2</sub> u fazama A-C unutarnjih nosivih zidova iznosi 28.800 kgCO<sub>2</sub>.



Slika 119 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za unutarnje nosive zidove

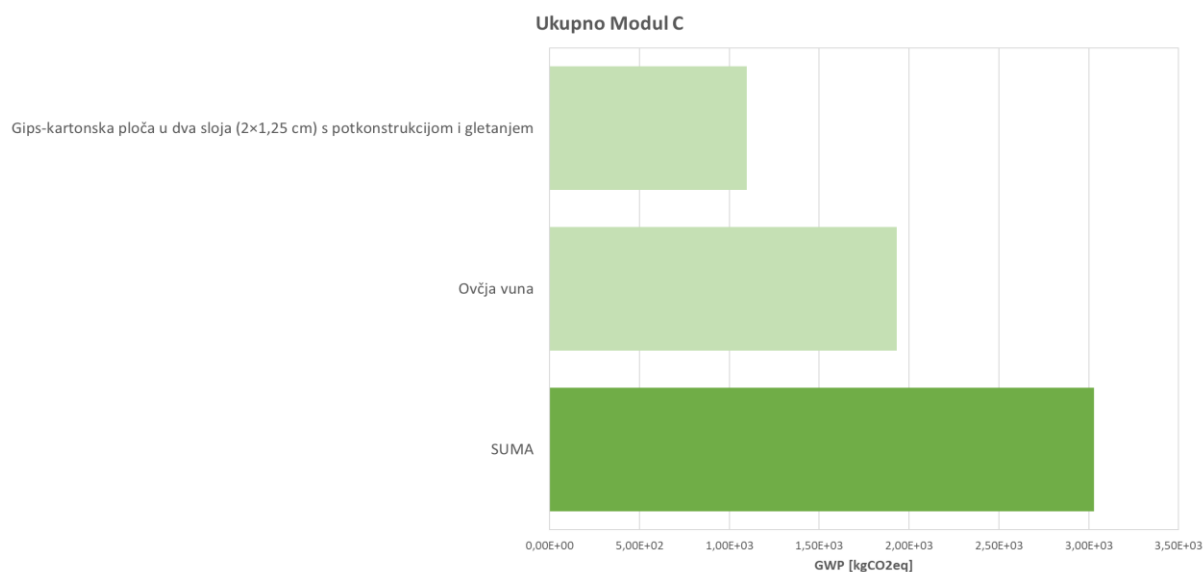
Kada fazama A i D pridodamo Modul D, dobivamo vrijednost emisije od 324 000 kg CO<sub>2</sub>.

## 7.6. Rezultati proračuna za pregradne zidove



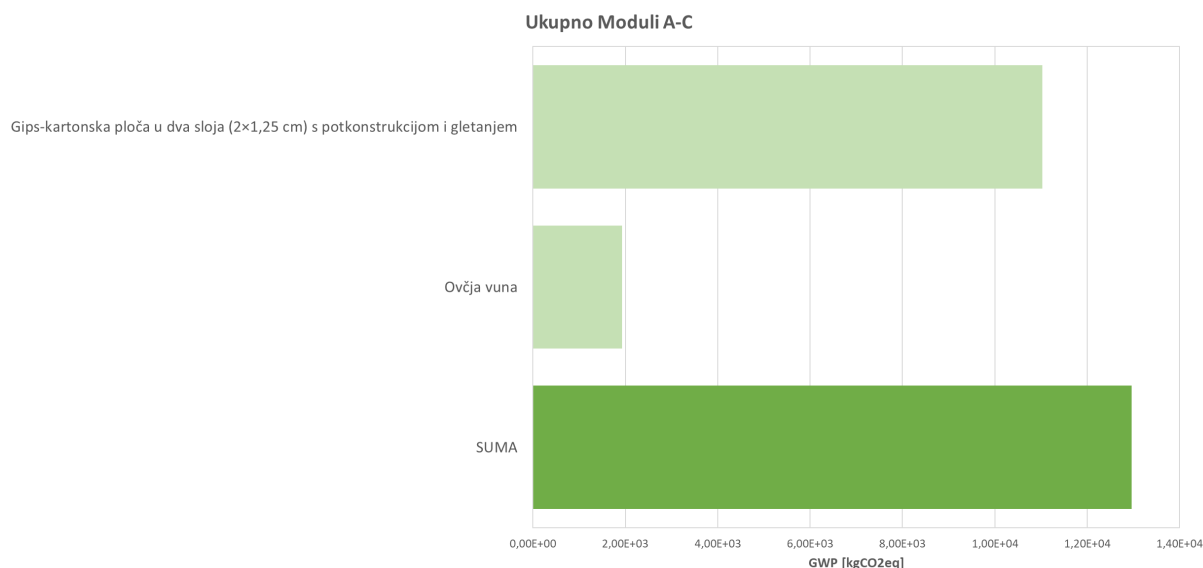
Slika 120 GWP vrijednosti modula A – Pregradni zidovi

Najviše emisije u fazi A javlja se u sustavu gipskartonskih ploča, dok je kod ovčje vune utjecaj neznatan. U fazi B nema emisije.

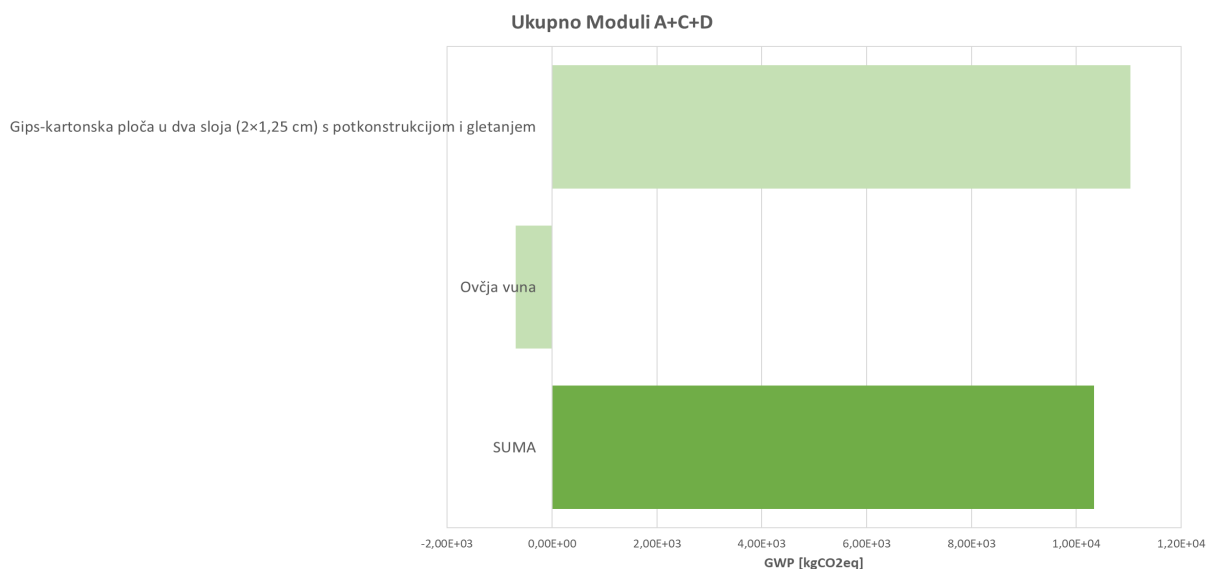


Slika 121 GWP vrijednosti modula C – Pregradni zidovi

U završnoj fazi životnog ciklusa ovčja vuna ima veću vrijednost emisije CO<sub>2</sub> od sustava gipskartonskih ploča.



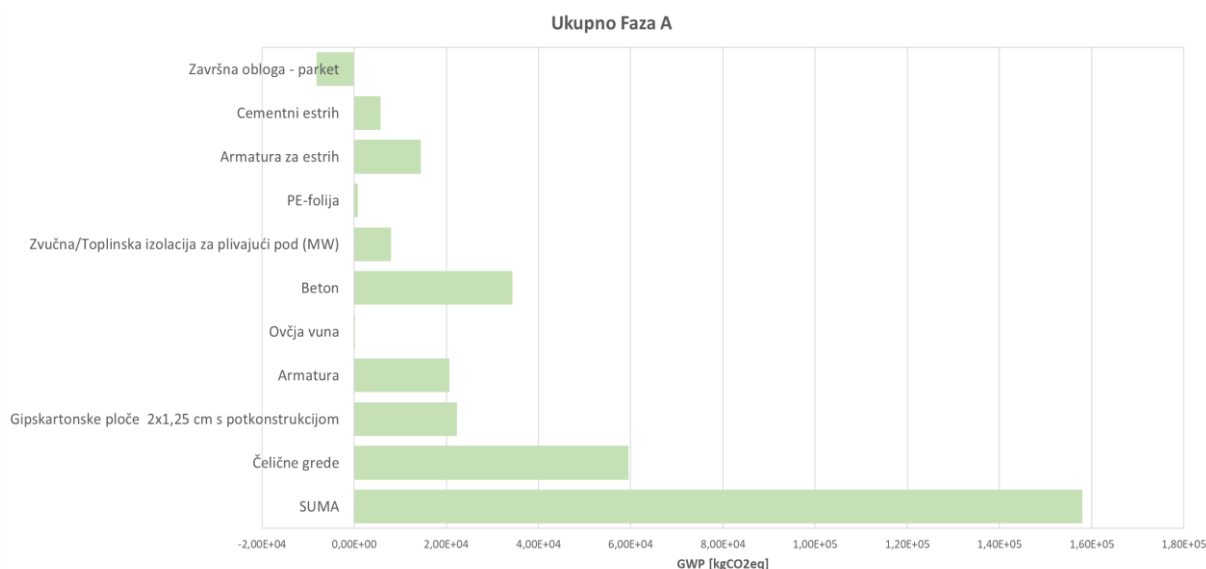
Slika 122 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za pregradne zidove



Slika 123 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za pregradne zidove

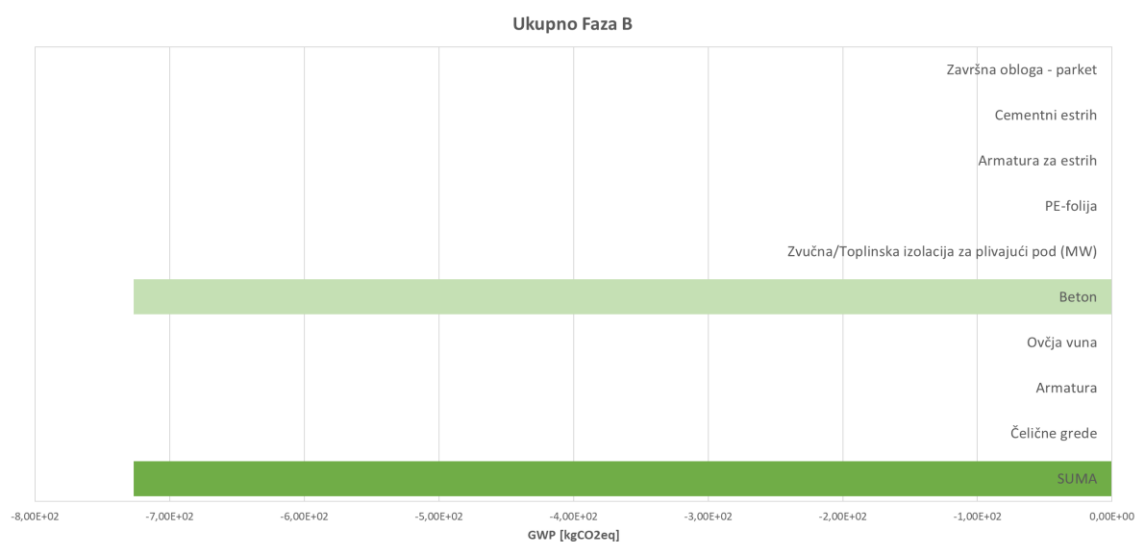
Kod pregradnih zidova dolazi do emisije 13 000 kg CO<sub>2</sub> u fazama A, B i C,, dok zbroj faza A+C+D daje vrijednost od 10.300 kg CO<sub>2</sub>.

## 7.7. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za međukatnu konstrukciju



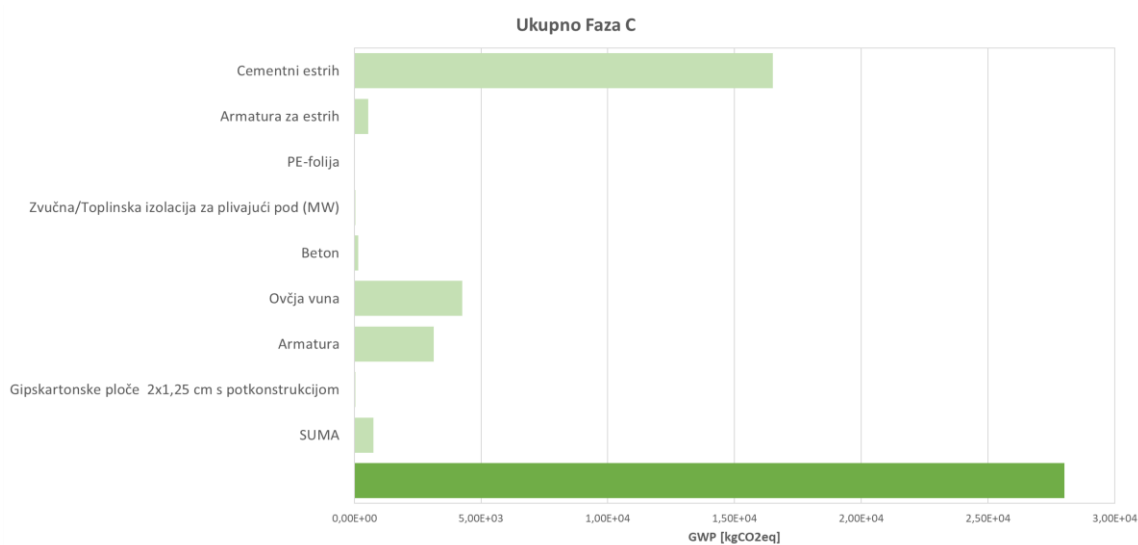
Slika 124 GWP vrijednosti modula A – Međukatna konstrukcija

Kao i u ostalim slučajevima, najveća emisija CO<sub>2</sub> događa se u čeliku i betonu, dok kod parketa dolazi do apsorpcije.



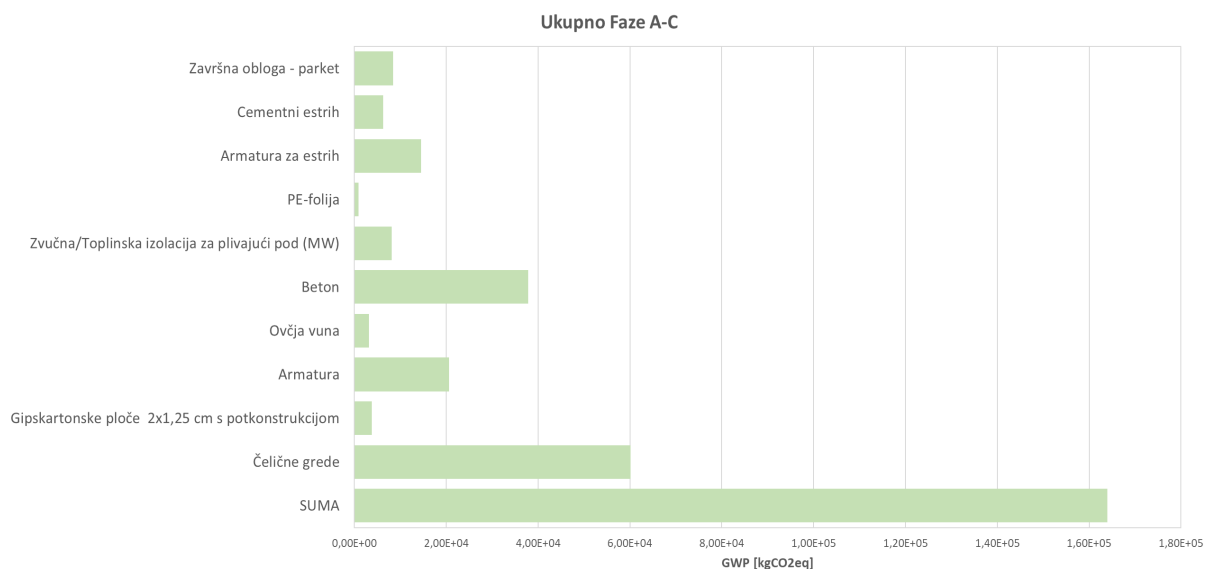
Slika 125 GWP vrijednosti modula B – Međukatna konstrukcija

U fazi uporabe u betonu dolazi do karbonatizacije pa zbog toga imamo apsorpciju CO<sub>2</sub>.



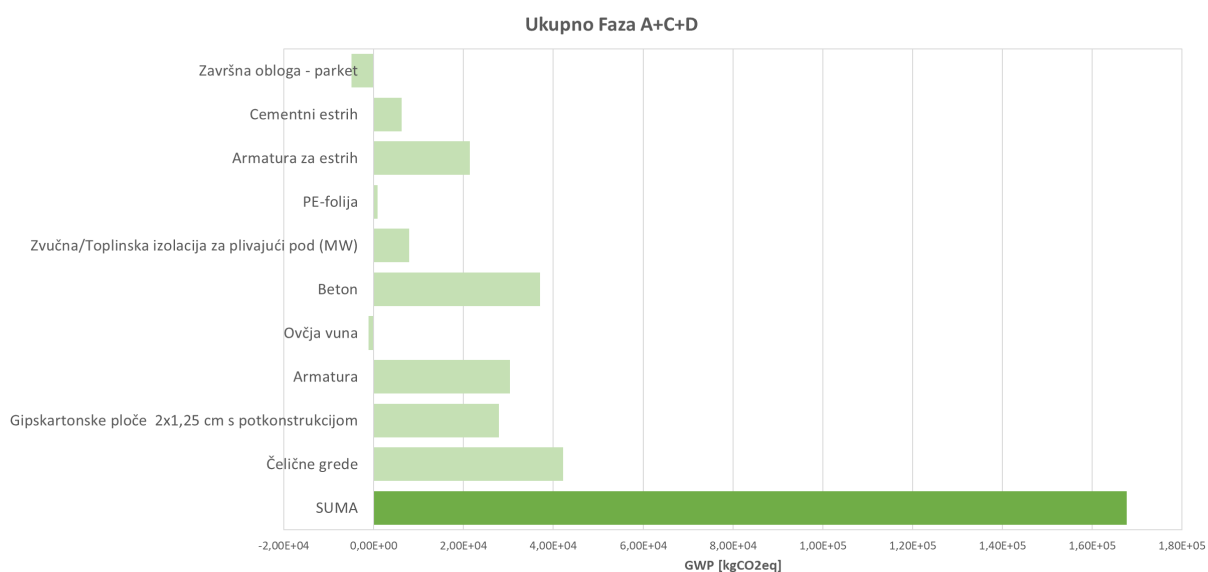
Slika 126 GWP vrijednosti modula C – Međukatna konstrukcija

U fazi C najveća je emisija kod cementnog estriha.



Slika 127 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za međukatnu konstrukciju

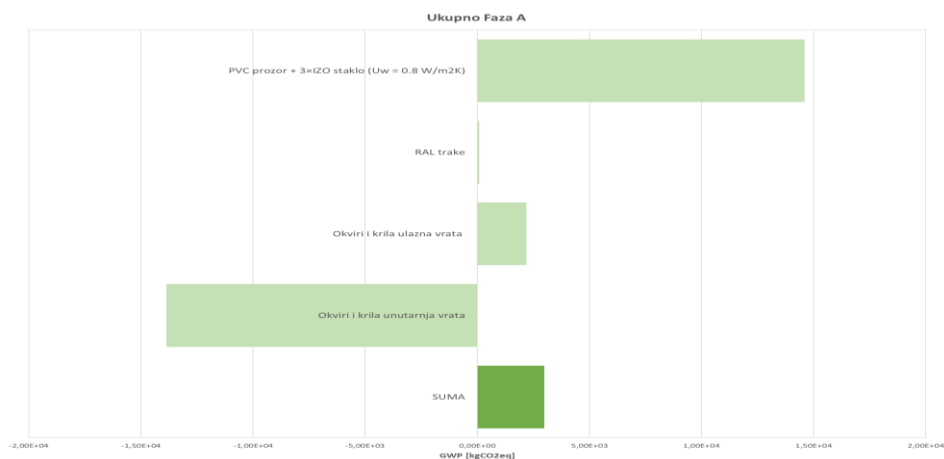
Kod međukatnih se konstrukcija javlja najveća emisija CO<sub>2</sub> koja iznosi 164 t CO<sub>2</sub>.



Slika 128 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za međukatnu konstrukciju

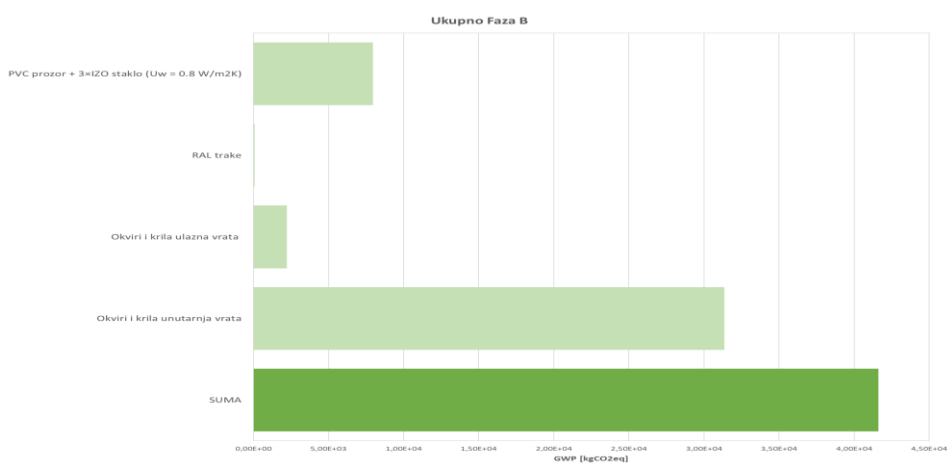
Zbroj faza A+C+D daje ukupnu vrijednost od 168 tone CO<sub>2</sub>. Apsorpcija se javlja kod parketa i ovčje vune.

## 7.8. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za otvore



Slika 129 GWP vrijednosti modula A– Vrata i prozori

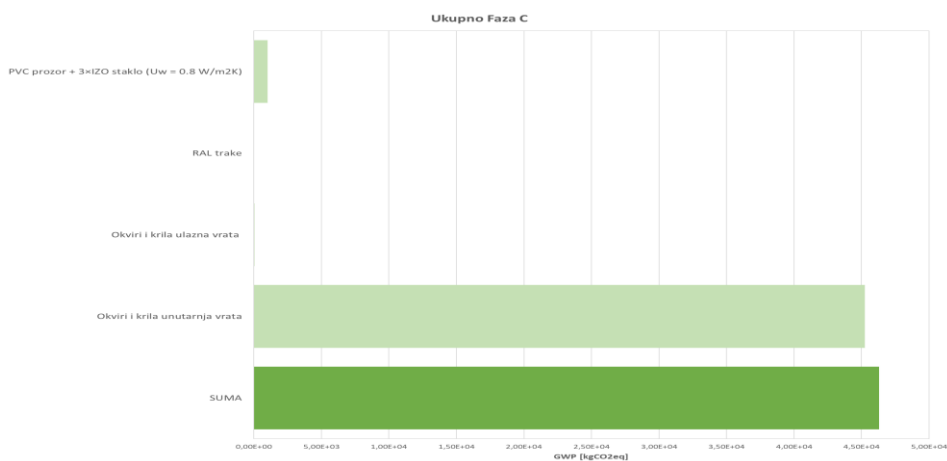
Budući da su unutarnja vrata drvena, a drvo apsorbira CO<sub>2</sub>, u modulu A dolazi do negativnih vrijednosti u tom području.



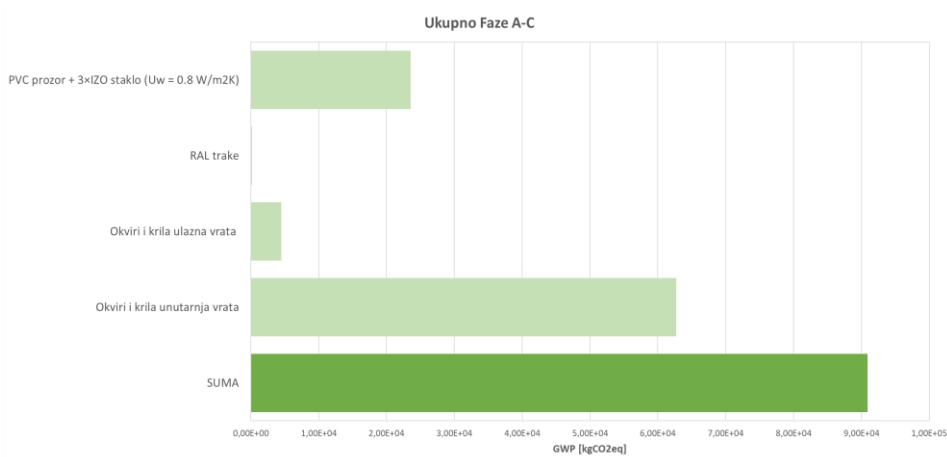
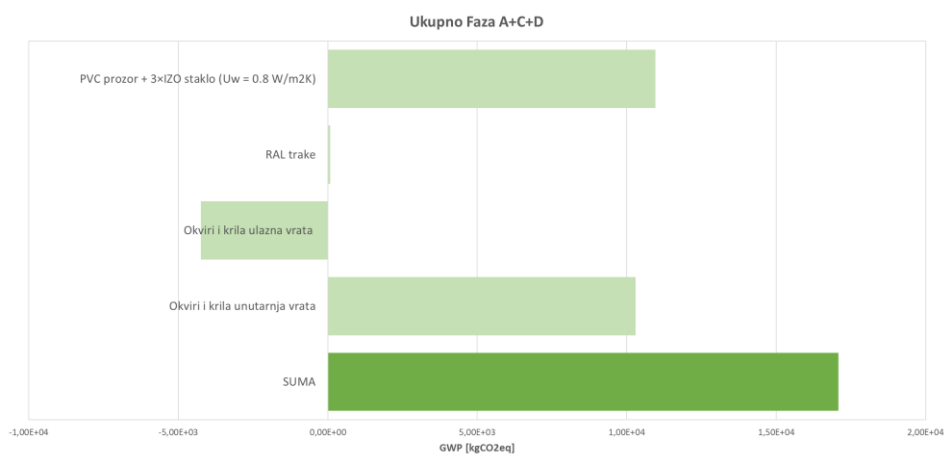
Slika 130 GWP vrijednosti modula C – Vrata i prozori

U modulu B imamo najveću emisiju CO<sub>2</sub> kod unutarnjih vrata.



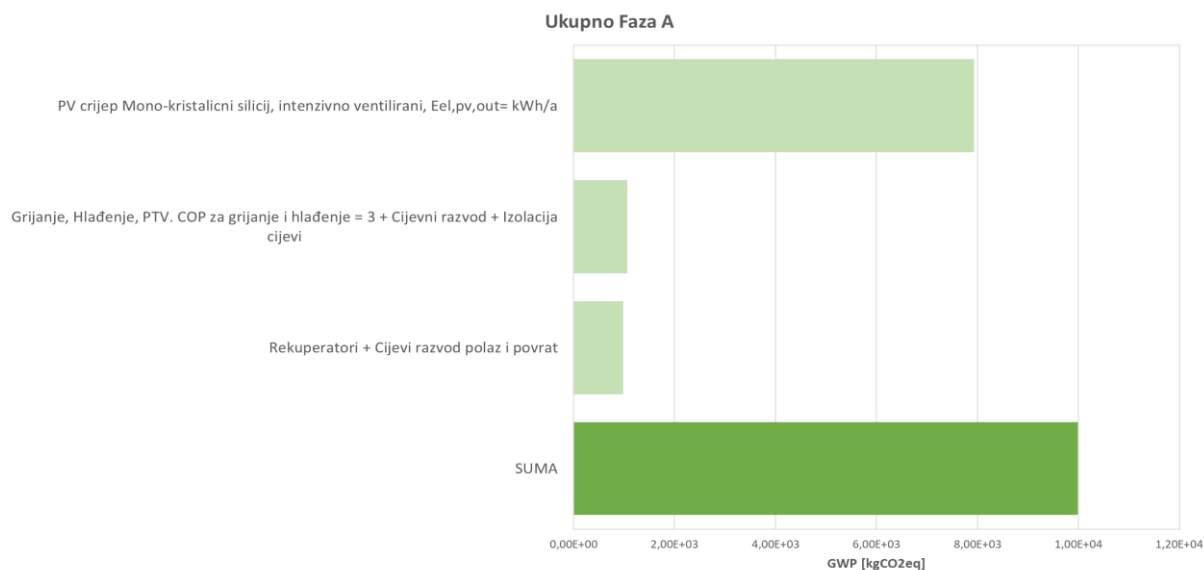


Slika 131 GWP vrijednosti modula C – Vrata i prozori

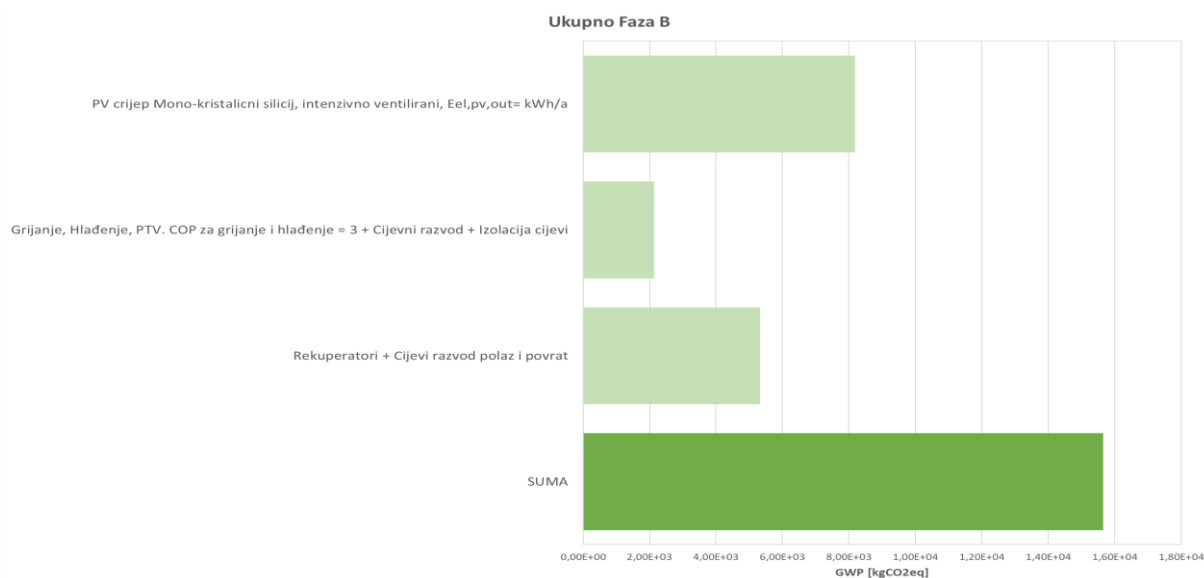
Slika 132 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za otvoreSlika 133 Procjena emisije CO<sub>2</sub> "za faze A+C+D za otvore

Kroz cijeli životni ciklus svih otvora i vrata imamo ukupnu emisiju CO<sub>2</sub> u vrijednosti od 90 900 kg CO<sub>2</sub>, dok u sumi modula A+C+D imamo emisiju u vrijednosti od 17 100 kg CO<sub>2</sub>.

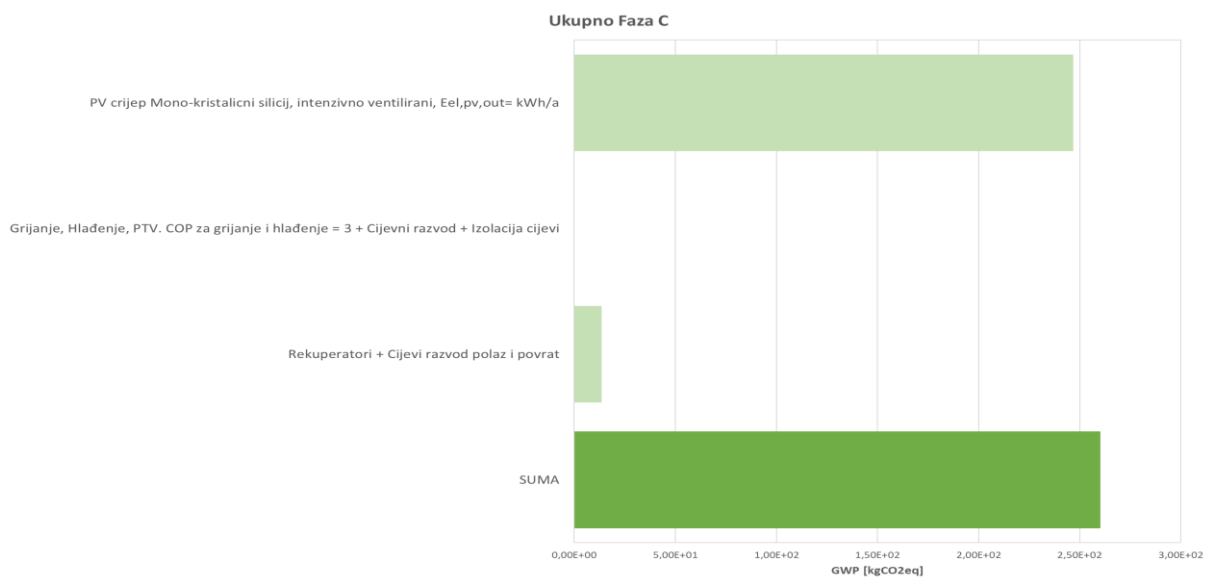
## 7.9. Rezultati proračuna emisije CO<sub>2</sub> za termotehničke sustave



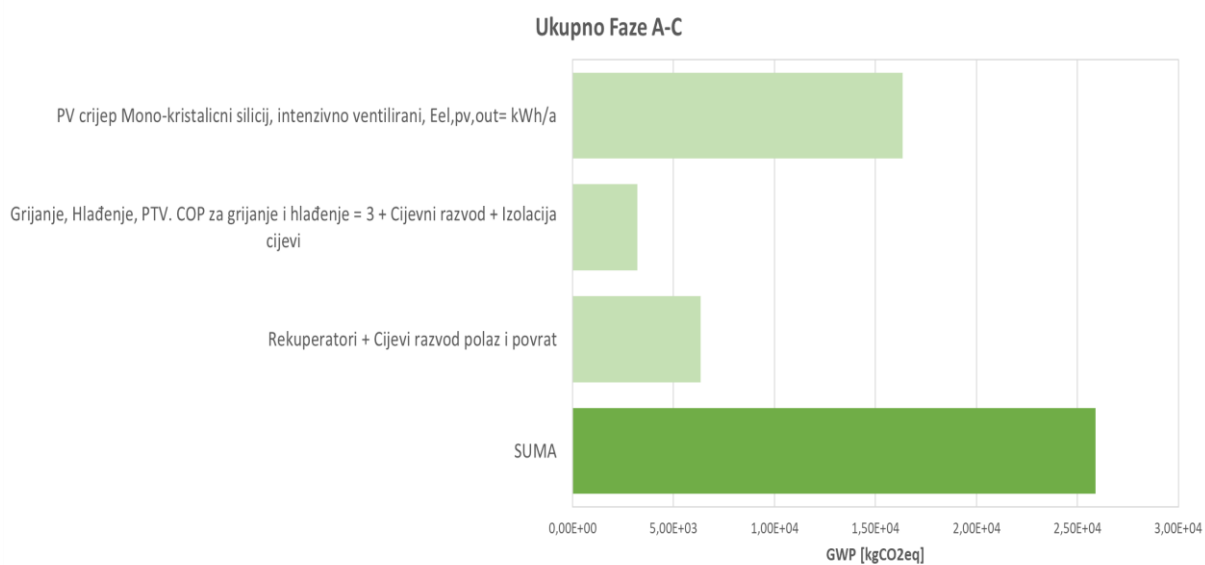
Slika 134 GWP vrijednosti modula A- termotehnički sustavi



Slika 135 GWP vrijednosti modula B- termotehnički sustavi

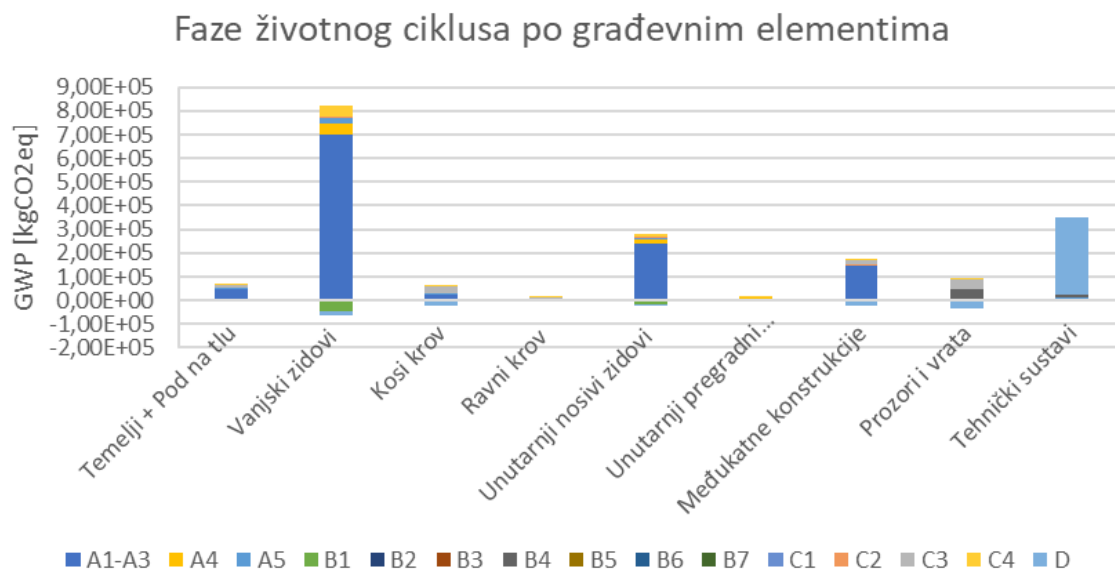


Slika 136 GWP vrijednosti modula C- termotehnički sustavi



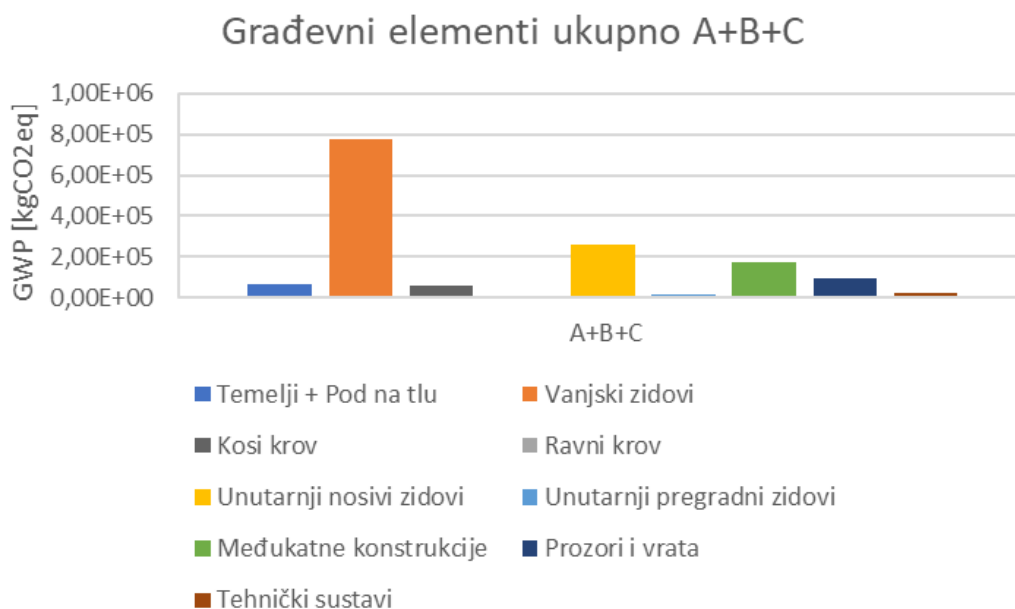
Slika 137 GWP vrijednosti modula A-C- termotehnički sustavi

## 7.10. Rekapitulacija rezultata



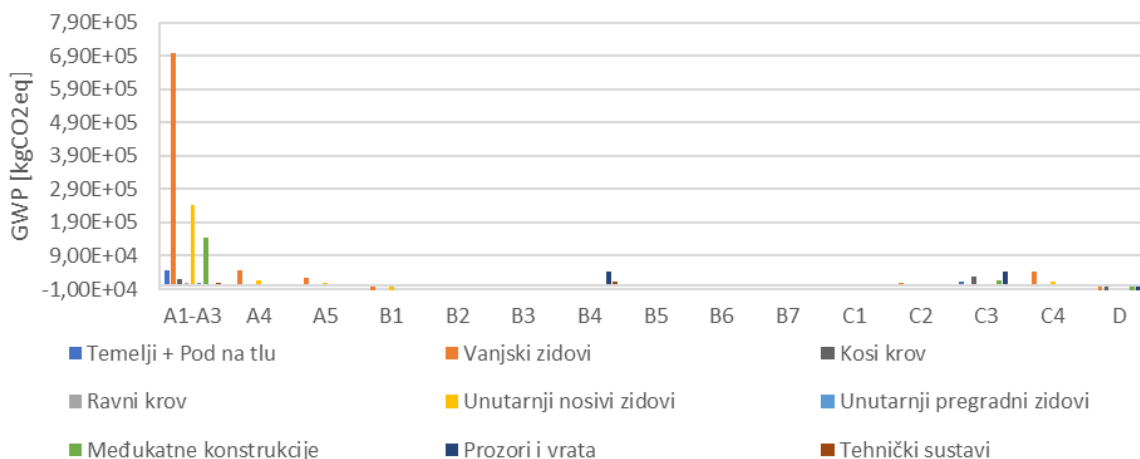
Slika 138 GWP vrijednosti po građevinskim elementima

Najveću vrijednost GWP imaju vanjski zidovi, unutarnji nosivi i međukatne konstrukcije.



Slika 139 GWP vrijednosti elemenata za sumu A+B+C faza

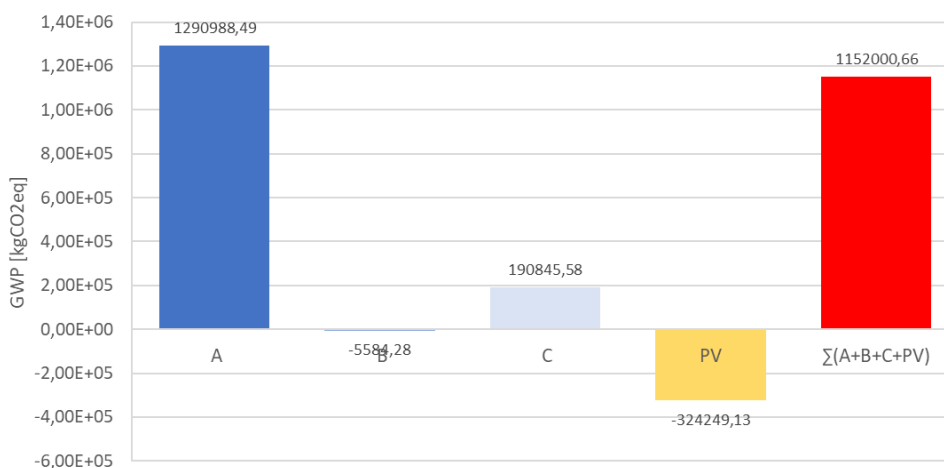
## Građevni elementi po fazama životnog ciklusa



Slika 140 GWP vrijednosti po fazama životnog ciklusa

Iz ovog je grafa vidljivo da se najveća emisija CO<sub>2</sub> plinova javlja u fazi proizvodnje građevinskih elemenata. Također odskoče vrijednost emisije u fazi D termotehničkih sustava što se može objasniti problemima s odlaganjem i reciklažom nakon njihova životnog vijeka.

Usporedba GWP za faze A, B i C te uštede GWP-a zbog proizvedene energije na PV sustavu



Slika 141 Usporedba faza A, B i C te uštede zbog proizvedene energije na PV sustavu

Najveće GWP vrijednosti imaju vanjski i unutarnji nosivi zidovi zbog velike količine opeke.

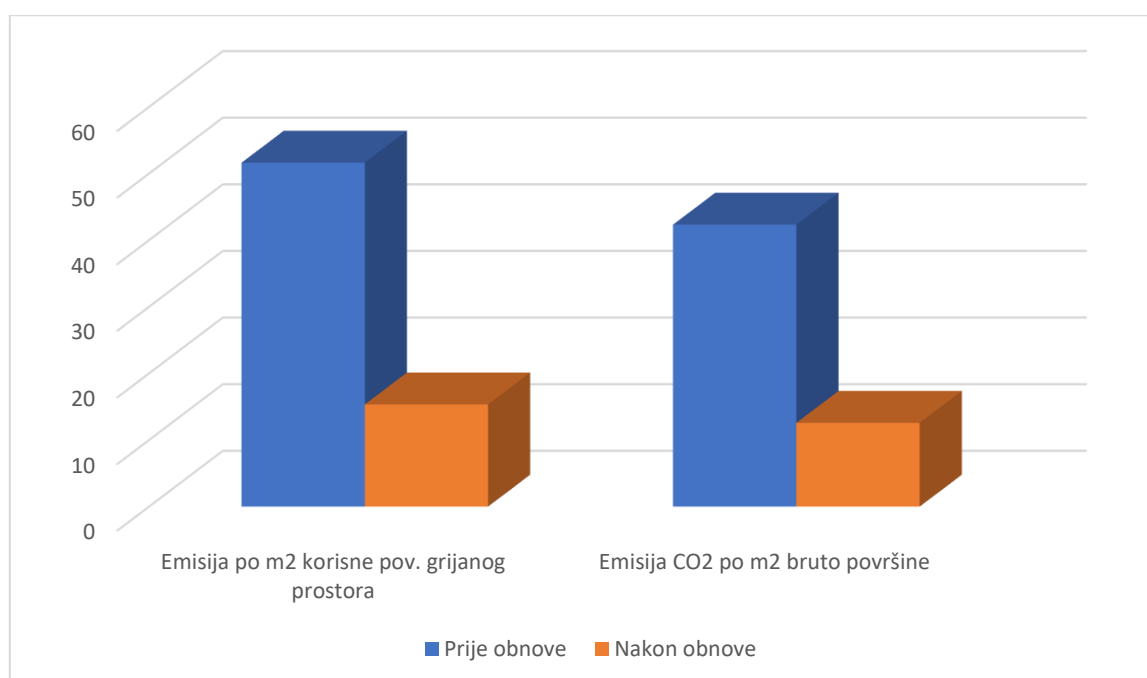
Ukupna emisija CO<sub>2</sub> po m<sup>2</sup> korisne površine grijanog dijela zgrade iznosi 15,33 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> godišnje, višak proizvodnje na PV sustavu generira uštede od 2,93 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> godišnje.

Kada rezultate iskažemo u odnosu na bruto površinu, imamo emisiju od 12,57 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> godišnje, i uštede zbog viška proizvodnje struje na PV sustavu od 2,40 kg kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

Danska je dala ograničenja za emisiju CO<sub>2</sub> za nove zgrade u vrijednosti od 12 kg/m<sup>2</sup> godišnje koje će se smanjivati u srpnju 2025. godine na 7,1 kg/ CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> godišnje. Nešto blaža ograničenja dala je Francuska u iznosu od 14 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. [25]

Predmetna zgrada ima nešto više vrijednosti od dopuštenih što se može smatrati kao prihvatljivo budući da se u našem slučaju radi o staroj zgradi koja ima prethodno ugrađene velike količine opeke.

Na grafu niže prikazana je razlika u emisiji CO<sub>2</sub> bez obnove (plavo) i nakon obnove (narančasto). Emisija CO<sub>2</sub> smanjila se je s 51,62 kgCO<sub>2</sub> po m<sup>2</sup> korisne površine grijanog prostora na 15,33 kgCO<sub>2</sub> po m<sup>2</sup>, što čini smanjenje od 70,30%.



Slika 142 Razlika u emisiji CO<sub>2</sub> prije i nakon obnove

## 8. ZAKLJUČAK

Kako bi se smanjile klimatske promjene, Europska unija donosi zakonodavni okvir kojim se želi spriječiti daljnji utjecaj na okoliš. Energetska učinkovitost obuhvaća mjere za smanjenje potrošnje energije uz očuvanje udobnosti u prostoru. Velika potrošnja energije povećava emisije CO<sub>2</sub>, pa je nužno provesti mjere kojima se potrošnja racionalizira. Jedna od mjera je da sve nove zgrade moraju udovoljavati NZEB zahtjevima. Europska komisija omogućava državama članicama da same definiraju minimalne zahtjeve za NZEB.

Energetska obnova kulturne baštine mora biti u skladu s zakonodavnim okvirima i očuvanjem njezinih svojstava. Osim povećanja energetske učinkovitosti, takva obnova donosi i druge koristi, poput smanjenja troškova održavanja, revitalizacije zapuštenih objekata i uklanjanja štetnih zahvata koji ugrožavaju kulturne vrijednosti. Također, poboljšava kvalitetu i udobnost korištenja, te usklađuje objekte u povijesnim područjima s okolnim prostorom, čime se povećava vrijednost zaštićenih cjelina. Kod obnove zgrada koje su dio kulturne baštine, nužno je pratiti konzervatorske smjernice.

Razvoj građevinske industrije povećao je potrošnju energije i emisiju CO<sub>2</sub>, budući da beton zahtijeva velike količine resursa i energije, a cement čini oko 7% globalnih emisija CO<sub>2</sub>. S obzirom na globalno zatopljenje, nužno je razvijati tehnologije koje će smanjiti emisije. Održiva gradnja postiže se izborom materijala s minimalnim utjecajem na okoliš kroz njihov cijeli životni ciklus.

Za potrebe istraživanja u ovom je radu pomoću odgovarajućih programskih paketa izrađen 3D model zgrade iz kojeg su dobivene karakteristike korištene za daljnji proračun fizike zgrade. Predložene su mjere energetske obnove pri kojima se je vodilo računa o smjernicama konzervatora budući da je zgrada dio kulturno povijesne cjeline. Kako ne bi došlo do narušavanja vanjskog izgleda zgrade, izvedena je toplinska izolacija s unutarnje strane.

Proračunati su termotehnički sustavi, dobivena je količina potrebnih solarnih panela koja pokriva 32,71% energije iz obnovljivih izvora (minimalni zahtjev iznosi 30%) te je dobiven energetska certifikat.

Usporedbom rezultata potrebne energije za rad termotehničkih sustava i primarne energije, dobiveni rezultati pokazuju značajne uštede.

Kako bi se smanjili toplinski gubici, bilo je važno pravilno riješiti toplinske mostove. Ovaj rad se fokusira na analizu i rješavanje pet specifičnih linijskih toplinskih mostova. Proračunom

je utvrđeno da su toplinski mostovi dobro riješeni te kod njih nema opasnosti od kondenzacije.

Za proračun vjerojatnosti kondenzacije vodene pare proveden je proračun difuzije vodene pare koristeći HAM modele. Za presjeke u kojima je postojala sumnja u kondenzaciju predložena su dva rješenja i provedeni su proračuni. Budući da su oba rješenja zadovoljila pri odabiru je uzeta u obzir emisija CO<sub>2</sub> te je odabrano rješenje s manjom emisijom.

Izvršen je proračun emisije CO<sub>2</sub> po elementima zgrade za njihov cijeli životni ciklus. Dobivene su najveće vrijednosti za vanjske i za nosive zidove zbog velike količine opeke. Povoljan utjecaj na emisije pokazao se je kod materijala od drva i ovčje vune. Dobivena je emisija plinova po m<sup>2</sup> koja je veća od smjernica koje su dale Danska i Francuska, no rezultati nisu loši ako se u obzir uzme da se radi o staroj zgradi u koju je u prošlosti ugrađena velika količina opeke.

Kod definiranja koncepta energetske obnove zgrade važno je analizirati odabrane mjere sa svih aspekata. Rješenja moraju biti povoljna s obzirom na utjecaj toplinskih mostova, higrotermalno ponašanje te emisiju CO<sub>2</sub>. Provedene mjere ne smiju smanjiti ugodnost prostora, a važno je i da su ekonomski opravdana.

Analiza rezultata energetske obnove pokazuje značajne uštede u potrebnoj energiji i veliko smanjenje emisije CO<sub>2</sub> nakon provedenih mjera obnove. Ti će rezultati, osim u uštedi novaca na energentima, pomoći u smanjenju globalnog zatopljenja i očuvanju okoliša.



## POPIS LITERATURE

- [1] Herega V, Amadori M. Energetska učinkovitost zgrada. Environmental Engineering - Inženjerstvo okoliša [Internet]. 2017 [pristupljeno 01.02.2025.];4(2):110-116. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/192580>
- [2] Ovčar J. Toplinski plašt građevine - nenasivi vanjski elementi; prozori i vrata. Zbornik radova Međimurskog veleučilišta u Čakovcu [Internet]. 2012 [pristupljeno 01.02.2025.];3(1):77-83. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/83441>
- [3] Šišić R, Hodžić A, Kevilj A, Hrustić O. TERMOGRAFIJA I ENERGETSKA UČINKOVITOST STAMBENIH OBJEKATA. Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS [Internet]. 2013 [pristupljeno 01.02.2025.];4(7):24-31. <https://doi.org/10.13167/2013.7.3>
- [4] Bertol-Vrčec J. Unutarnja plošna temperatura toplinskih mostova. Prostor [Internet]. 1999 [pristupljeno 01.02.2025.];7(1(17)):121-136. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/24031>
- [5] Porhincák M, Eštoková A. Environmental Profile of Building Materials of a Single Family House. Organization, technology & management in construction [Internet]. 2011 [pristupljeno 16.02.2025.];3(2):348-353. <https://doi.org/10.5592/otmcj.2011.2.7>
- [6] Fuk B. Solarni paneli i što s njima kad postanu otpad. Sigurnost [Internet]. 2022 [pristupljeno 02.02.2025.];64(2):191-195. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/280063>
- [7] Milovanović B, Bagarić M. Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije. Građevinar [Internet]. 2020 [pristupljeno 06.02.2025.];72(08.):703-720. <https://doi.org/10.14256/JCE.2923.2020>
- [8] Zajednički informacijski sustav zzemljišnih knjiga i katastra – javna aplikacija \_Dostupno na : <https://oss.uredjenazemlja.hr/map> (Pristupljeno u siječnju 2025. )
- [9] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. NN 128/2020. Zagreb: Narodne novine; 2020. [pristupljeno 17. veljače 2025.]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008\\_09\\_110\\_3240.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_09_110_3240.html)

- [10] Preporuke za primjenu mjera energetske učinkovitosti na graditeljskoj baštini dostupno na:<https://min-kulture.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Preporuke%20za%20primjenu%20mjera%20energetske%20u%C4%8Dinkovitosti%20na%20graditeljskoj%20ba%C5%A1tini.pdf> (pristupljeno u siječnju 2025.)
- [11] Milovanović Bojan Osnovni principi projektiranja Nzeb Dostupno na: [https://www.wienerberger.hr/content/dam/wienerberger/croatia/marketing/documents-magazines/webinari/HR\\_MKT\\_WEB\\_Osnovni%20principi%20projektiranja%20nZEB.pdf](https://www.wienerberger.hr/content/dam/wienerberger/croatia/marketing/documents-magazines/webinari/HR_MKT_WEB_Osnovni%20principi%20projektiranja%20nZEB.pdf) (pristupljeno u siječnju 2025.)
- [12] Vrančić T. - Pravilna ugradnja stolarije – RAL montaža (II. dio) Građevinar [Internet]. 2020 [pristupljeno 06.02.2025.]; Dostupno na: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-72-2020-9-10-PROFINE>
- [13] Šišić R, Hodžić A, Kevilj A, Hrustić O. TERMOGRAFIJA I ENERGETSKA UČINKOVITOST STAMBENIH OBJEKATA. Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS [Internet]. 2013 [pristupljeno 09.02.2025.];4(7):24-31. <https://doi.org/10.13167/2013.7.3>
- [14] Europski parlament, Vijeće Europske unije. Direktiva (EU) 2024/1275 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. veljače 2024. kojom se mijenja Uredba (EU) 2019/1020 o nadzoru tržišta i usklađenosti proizvoda. Službeni list Europske unije. 2024
- [15] Koster.hr. Brtvljenje podruma iznutra u slučaju vlage iz tla pod pritiskom i bez pritiska vode. Koster.hr. [pristupljeno 5. veljače 2025.]. Dostupno na: [https://www.koster.hr/hr\\_hr/foa-141-96/brtvljenje+podruma+iznutra+u+slu%C4%8Daju+vlage+iz+tla+pod+pritiskom+i+bez+pritiska+vode.html](https://www.koster.hr/hr_hr/foa-141-96/brtvljenje+podruma+iznutra+u+slu%C4%8Daju+vlage+iz+tla+pod+pritiskom+i+bez+pritiska+vode.html)
- [16] Štirmer N. Utjecaj građevnog materijala na okoliš. Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi [Internet]. 2012 [pristupljeno 09.02.2025.];(1.):293-311. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/97380>
- [17] Krejza Z, Kocourkova G, Vankova L, Sebestova M. Varijante određivanja ugljičnog otiska građevinske proizvodnje. Građevinar [Internet]. 2023 [pristupljeno 15.02.2025.];75(03.):273-281. <https://doi.org/10.14256/JCE.3396.2021>
- [18] Vukadin J. Istraživanje mogućnosti energetske obnove zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet;

- 
- 2024 [pristupljeno 15.02.2025.] Dostupno na:  
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:802863>
- [19] Čizmar L. Kondenzacija vlage u stambenim prostorima [Završni rad]. Koprivnica: Sveučilište Sjever; 2018 [pristupljeno 16.02.2025.] Dostupno na:  
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:725889>
- [20] What is WUFI, WUFI programski paket (Pristupljeno 16.2.2025.) Dostupno na:  
<https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>
- [21] KI Expert Plus, programski paket; Dostupno na:  
<https://www.knaufinsulation.hr/en/node/416>
- [22] Peulić Đ. Konstruktivni elementi zgrada. Zagreb: CROATIANKNJIKA; 2002.
- [23] Kerr, Jonathan, et al. "Comparative analysis of the global warming potential (GWP) of structural stone, concrete and steel construction materials." *Sustainability* 14.15 (2022): 9019.

## POPIS SLIKA

Slika 1 Shematski prikaz provedenog istraživanja.....	2
Slika 2 Kyoto piramida projektiranja NZEB-a [7].....	6
Slika 3 Infiltracija i eksfiltracija zraka kroz građevne dijelove [7].....	7
Slika 4 Povećani toplinski tok [7].....	9
Slika 5 Termogram toplinskog mosta i fotografija posljedica [7].....	9
Slika 6 Ugradnja prozora [7].....	11
Slika 7 Prikaz temperature na površini stakla ovisno o U vrijednosti, broju i poziciji low e premaza [11].....	12
Slika 8 Pravilna ugradnja prozora [12].....	13
Slika 9 Termogram vanjske ovojnice zgrade s izraženim toplinskim mostovima [11].....	14
Slika 10 Životni ciklus betona [16].....	23
Slika 11 Mogućnosti smanjenja emisije CO <sub>2</sub> u industriji cementa [16].....	24
Slika 12 Tlocrt podruma (lijevo) i prizemlja (desno) s označenim grijanim i negrijanim prostorima.....	26
Slika 13 Presjeci zgrade s označenim grijanim i negrijanim prostorima.....	27
Slika 14 Model bruto volumena grijanog dijela zgrade.....	27
Slika 15 Prikaz 3D modela predmetne zgrade.....	29
Slika 16 Sustav za brtvljenje podruma iznutra u slučaju vlage iz tla [15].....	32
Slika 17 Detalj toplinskog mosta za pod prema tlu [21].....	35
Slika 18 Isječak iz energetske certifikata zgrade.....	40
Slika 19 Usporedba potrebne energije prije i nakon obnove.....	41
Slika 20 Uzdužni presjek građevine s prikazom detalja toplinskih mostova.....	43
Slika 21 Poprečni presjek zgrade s prikazom detalja toplinskih mostova.....	43
Slika 22 Prikaz detalja D1 na presjeku zgrade.....	44
Slika 23 Polukružni križni svod [22].....	44
Slika 24 Prikaz detalja D1 za potrebe proračuna sa slojevima materijala i rubnim uvjetima.....	45
Slika 25 Temperaturni prikaz detalja D1.....	47
Slika 26 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini.....	48
Slika 27 Pojednostavljeni prikaz detalja D1 – drugi slučaj.....	49
Slika 28 Temperaturni prikaz detalja D1 – drugi slučaj.....	50
Slika 29 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini.....	51
Slika 30 Prikaz detalja na presjeku zgrade.....	52

---

Slika 31 Model detalja D2 .....	53
Slika 32 Temperaturni prikaz detalja D2 .....	54
Slika 33 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini.....	55
Slika 34 Detalj D3 na presjeku zgrade .....	56
Slika 35 Model detalja D3 – prvi slučaj .....	57
Slika 36 Temperaturni prikaz detalja D3 .....	58
Slika 37 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini.....	59
Slika 38 Pojednostavljeni prikaz detalja D3- drugi slučaj.....	60
Slika 39 Temperaturni prikaz detalja D3 – drugi slučaj.....	61
Slika 40 U – vrijednosti detalja D3 -drugi slučaj.....	62
Slika 41 Detalj D4.....	63
Slika 42 Pojednostavljeni prikaz detalja D4 .....	63
Slika 43 Temperaturni prikaz detalja D4.....	65
Slika 44 U – vrijednosti detalja D4 i minimalne temperature .....	66
Slika 45 Detalj D5.....	67
Slika 46 Pojednostavljeni prikaz detalja D5 .....	68
Slika 47 Temperaturni prikaz detalja D5 .....	69
Slika 48 Prikaz U vrijednosti i minimalnih temperatura na površini.....	70
Slika 49 Klimatski uvjeti u Innsbrucku (WUFI Light).....	72
Slika 50 Unutarnji uvjeti.....	73
Slika 51 Higrotermalni uvjeti za tlo .....	73
Slika 52 Ukupna količina vlage u vanjskom zidu .....	74
Slika 53 Ukupna količina vlage u opeki.....	74
Slika 54 Količina vlage u vanjskom zidu u 10-godišnjem razdoblju .....	75
Slika 55 Količina vlage u sloju mineralne vune.....	75
Slika 56 Odnos relativne vlažnosti i temperature na vanjskoj površini zida .....	76
Slika 57 Odnos temperature na kritičnom dijelu mineralne vune i temperature rosišta.....	76
Slika 58 Odnos temperature unutarnje površine zida i temperature rosišta.....	77
Slika 59 Izoplete za spoj mineralne vune i zida.....	78
Slika 60 Izoplete na unutrašnjoj površini zida .....	78
Slika 61 Izoplete na vanjskoj površini zida .....	79
Slika 62 Ukupan sadržaj vlage u ravnom krovu .....	79
Slika 63 Ukupna količina vlage u 10-godišnjem razdoblju.....	80
Slika 64 Ukupna količina vlage u ekstrudiranom polistirenu.....	80
Slika 65 Ukupna količina vlage u sloju armiranog betona.....	81
Slika 66 Prikaz temperature u sloju XPS-a i temperature rosišta .....	81
Slika 67 Prikaz temperature betona i temperature rosišta u AB ploči.....	82

Slika 68 Izoplete na unutrašnjoj strani zida .....	82
Slika 69 Odabrani slojevi za presjek kroz mineralnu vunu .....	83
Slika 70 Ukupna količina vlage u presjeku krova kroz mineralnu vunu.....	83
Slika 71 Ukupna količina vlage u zadnjem sloju mineralne vune. ....	84
Slika 72 Temperatura u posljednjem sloju mineralne vune i temperature rosišta.....	84
Slika 73 Odnos temperature u prvom sloju mineralne vune i temperature rosišta.....	85
Slika 74 Odabrani slojevi za presjek kosog krova kroz rog.....	85
Slika 75 Ukupni sadržaj vlage u presjeku krova kroz rog.....	86
Slika 76 Ukupna količina vlage u posljednjem sloju mineralne vune.....	86
Slika 77 Ukupna količina vlage u rogu.....	87
Slika 78 Ukupna količina vlage na dodiru mineralne vune i parne brane .....	87
Slika 79 Prikaz temperature u sloju mineralne vune i temperature rosišta.....	88
Slika 80 Prikaz temperature u prvom sloju mineralne vune i temperature rosišta.....	88
Slika 81 Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i roga i temperature rosišta	89
Slika 82 Izoplete na unutrašnjoj strani krova.....	89
Slika 83 Ukupna količina vlage u podrumskom zidu – prvi slučaj.....	90
Slika 84 Ukupna količina vlage u sloju ekspaniranog polistirena.....	90
Slika 85 Ukupna količina vlage u unutrašnjem zidu.....	91
Slika 86 Prikaz temperature na dodiru vanjskog zida i toplinske izolacije i temperature rosišta.....	91
Slika 87 Prikaz temperature na dodiru toplinske izolacije i vanjskog zida i temperature rosišta.....	92
Slika 88 Prikaz higrotermalnih uvjeta na unutarnjoj strani zida u podrumu .....	92
Slika 89 Odabrani slojevi za drugi slučaj zida.....	93
Slika 90 Ukupna količina vlage u podrumskom zidu.....	93
Slika 91 Ukupna količina vlage u vanjskom zidu.....	94
Slika 92 Ukupna količina vlage u unutrašnjem zidu.....	94
Slika 93 Prikaz temperature u unutrašnjem zidu i temperature rosišta.....	95
Slika 94 Prikaz temperature na kontaktnoj površini mineralne vune i temperature rosišta .....	95
Slika 95 Izoplete higrotermalnih uvjeta za unutrašnjost zid .....	96
Slika 96 GWP vrijednosti modula A – Pod na tlu .....	98
Slika 97 GWP vrijednosti modula B– Pod na tlu.....	98
Slika 98 GWP vrijednosti modula C– Pod na tlu .....	99
Slika 99 Procjena emisije CO <sub>2</sub> "od kolijevke pa do groba" za pod na tlu .....	99
Slika 100 Procjena emisije CO <sub>2</sub> "za faze A+C+D za pod na tlu .....	100
Slika 101 GWP vrijednosti modula A – Vanjski zidovi .....	101

---

Slika 102 GWP vrijednosti modula B – Vanjski zidovi.....	101
Slika 103 GWP vrijednosti modula C – Vanjski zidovi .....	102
Slika 104 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za vanjske zidove .....	102
Slika 105 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za vanjske zidove.....	103
Slika 106 GWP vrijednosti modula B – Kosi krov .....	103
Slika 107 GWP vrijednosti modula C – Kosi krov.....	104
Slika 108 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za kosi krov.....	104
Slika 109 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za pod kosi krov .....	105
Slika 110 GWP vrijednosti modula A – Ravni krov.....	105
Slika 111 GWP vrijednosti modula B – Ravni krov.....	106
Slika 112 GWP vrijednosti modula C – Ravni krov.....	106
Slika 113 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za ravni krov .....	107
Slika 114 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za ravni krov.....	107
Slika 115 GWP vrijednosti modula A – Unutarnji nosivi zidovi.....	108
Slika 116 GWP vrijednosti modula B – Unutarnji nosivi zidovi.....	108
Slika 117 GWP vrijednosti modula C – Unutarnji nosivi zidovi .....	109
Slika 118 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za unutarnje nosive zidove....	109
Slika 119 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za unutarnje nosive zidove .....	110
Slika 120 GWP vrijednosti modula A – Pregradni zidovi.....	110
Slika 121 GWP vrijednosti modula C – Pregradni zidovi .....	111
Slika 122 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za pregradne zidove.....	111
Slika 123 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za pregradne zidove.....	112
Slika 124 GWP vrijednosti modula A – Međukatna konstrukcija.....	112
Slika 125 GWP vrijednosti modula B – Međukatna konstrukcija.....	113
Slika 126 GWP vrijednosti modula C – Međukatna konstrukcija.....	113
Slika 127 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za međukatnu konstrukciju...	114
Slika 128 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za međukatnu konstrukciju .....	114
Slika 129 GWP vrijednosti modula A– Vrata i prozori.....	115
Slika 130 GWP vrijednosti modula C – Vrata i prozori .....	115
Slika 131 GWP vrijednosti modula C – Vrata i prozori .....	116
Slika 132 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “od kolijevke pa do groba” za otvore .....	116
Slika 133 Procjena emisije CO <sub>2</sub> “za faze A+C+D za otvore .....	116
Slika 134 GWP vrijednosti modula A- termotehnički sustavi .....	117
Slika 135 GWP vrijednosti modula B- termotehnički sustavi .....	117
Slika 136 GWP vrijednosti modula C- termotehnički sustavi.....	118
Slika 137 GWP vrijednosti modula A-C- termotehnički sustavi.....	118
Slika 138 GWP vrijednosti po građevinskim elementima .....	119

Slika 139 GWP vrijednosti elemenata za sumu A+B+C faza.....	119
Slika 140 GWP vrijednosti po fazama životnog ciklusa.....	120
Slika 141 Usporedba faza A, B i C te uštede zbog proizvedene energije na PV sustavu.	120
Slika 142 Razlika u emisiji CO <sub>2</sub> prije i nakon obnove.....	121



## POPIS TABLICA

Tablica 1 Specifična godišnja potrošnja energije za grijanje i primarna energija [7] .....	5
Tablica 2 Klimatski podaci za referentnu postaju Zagreb Grič.....	28
Tablica 3 Geometrijske karakteristike zgrade dobivene iz 3D modela.....	30
Tablica 4 Slojevi vanjskog zida .....	31
Tablica 5 Slojevi zida prema negrijanim prostorijama .....	31
Tablica 6 Slojevi pregradnih zidova.....	32
Tablica 7 Slojevi poda na tlu.....	33
Tablica 8 Slojevi kosog krova.....	33
Tablica 9 Slojevi ravnog krova .....	34
Tablica 10 Proračun građevinskih dijelova zgrade.....	34
Tablica 11 Popis ugrađenih otvora sa pripadajućim U-vrijednostima.....	35
Tablica 12 Ukupni koeficijenti transmisijskih gubitaka.....	36
Tablica 13 Ukupni dobici topline.....	36
Tablica 14 Rezultat proračuna termotehničkog sustava grijanja .....	37
Tablica 15 Rezultat proračuna termotehničkog sustava pripreme PTV.....	37
Tablica 16 Rezultat proračuna termotehničkog sustava hlađenja.....	38
Tablica 17 Rezultat proračuna potrebne energije za rasvjetu.....	38
Tablica 18 Rezultat proračuna proizvedene energije u fotonaponskom sustavu 1.....	39
Tablica 19 Rezultat proračuna proizvedene energije u fotonaponskom sustavu 2.....	39
Tablica 20 Karakteristike materijala.....	46
Tablica 21 Rubni uvjeti .....	46
Tablica 22 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova – D1 prvo rješenje .....	46
Tablica 23 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D1 prvi slučaj .....	47
Tablica 24 $\Psi$ vrijednosti D1-prvi slučaj .....	48
Tablica 25 Karakteristike materijala.....	49
Tablica 26 Rubni uvjeti .....	50
Tablica 27 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova -D1 – drugo rješenje .....	50
Tablica 28 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D1-drugi slučaj.....	51
Tablica 29 $\Psi$ vrijednosti D1-drugi slučaj.....	51
Tablica 30 Svojstva materijala .....	53
Tablica 31 Rubni uvjeti .....	53
Tablica 32 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D2 .....	54
Tablica 33 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D2.....	54

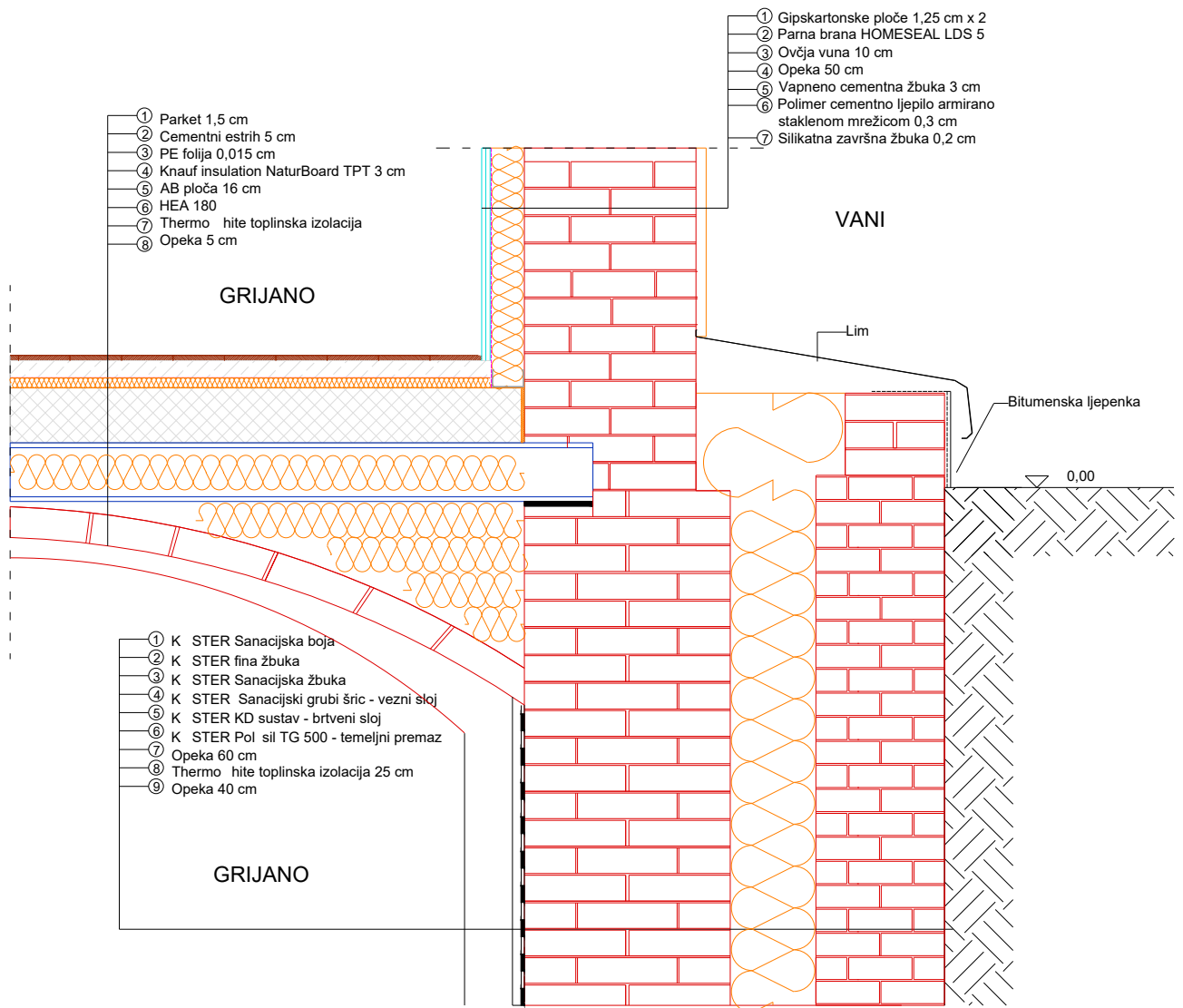
---

Tablica 34 $\Psi$ vrijednosti D2 .....	55
Tablica 35 Svojstva materijala .....	57
Tablica 36 Rubni uvjeti .....	57
Tablica 37 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D3 – prvo rješenje.....	57
Tablica 38 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D3- prvi slučaj .....	58
Tablica 39 $\Psi$ vrijednosti D3-prvi slučaj .....	59
Tablica 40.....	60
Tablica 41 Rubni uvjeti .....	60
Tablica 42 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D3 – drugi slučaj.....	60
Tablica 43 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D3 drugi slučaj.....	61
Tablica 44 $\Psi$ vrijednosti D3-drugi slučaj.....	62
Tablica 45 Karakteristike materijala.....	64
Tablica 46 Rubni uvjeti .....	64
Tablica 47 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D4 .....	64
Tablica 48 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ faktor – D4.....	65
Tablica 49 $\Psi$ vrijednosti D4 .....	66
Tablica 50 Svojstva materijala .....	68
Tablica 51 Rubni uvjeti .....	68
Tablica 52 Vrijednosti duljinskih toplinskih mostova D5 .....	69
Tablica 53 Vrijednosti pri kojima dolazi do kondenzacije i $f_{Rsi}$ factor – D5.....	69
Tablica 54 $\Psi$ vrijednosti D5 .....	70
Tablica 55 Faze uporabnog vijeka građevine [17] .....	97

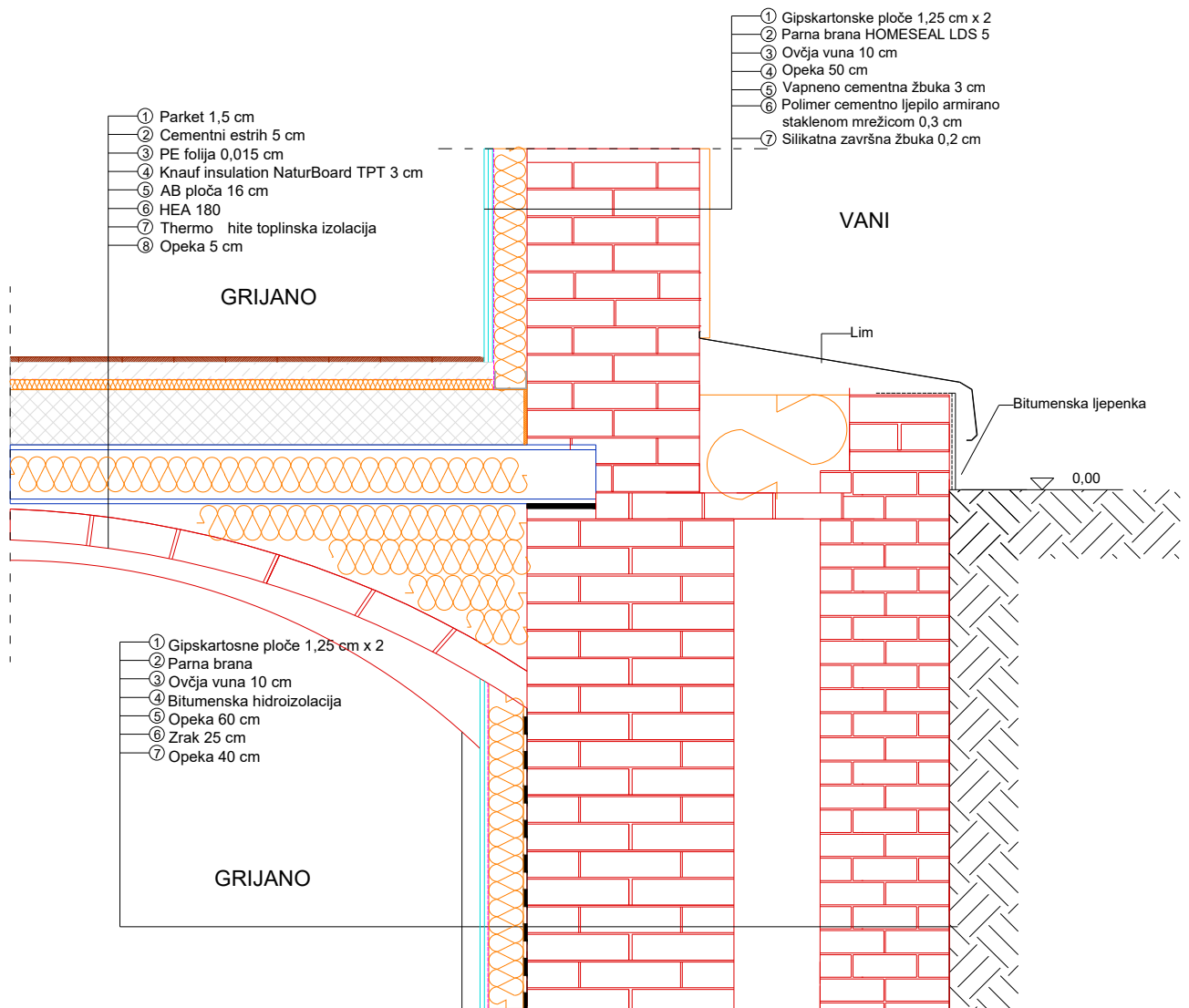
## PRILOG A

### Sadržaj priloga A

1. Detalj D1 – prvi slučaj
2. Detalj D2 – drugi slučaj
3. Detalj D2
4. Detalj D3 – prvi slučaj
5. Detalj D3 – drugi slučaj
6. Detalj D4
7. Detalj D5



Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu	
Predmet:	Diplomski rad
Izradila:	Anamarija Šuštić
Sadržaj:	Detalj 1 - prvi slučaj
Mjerilo:	1:10



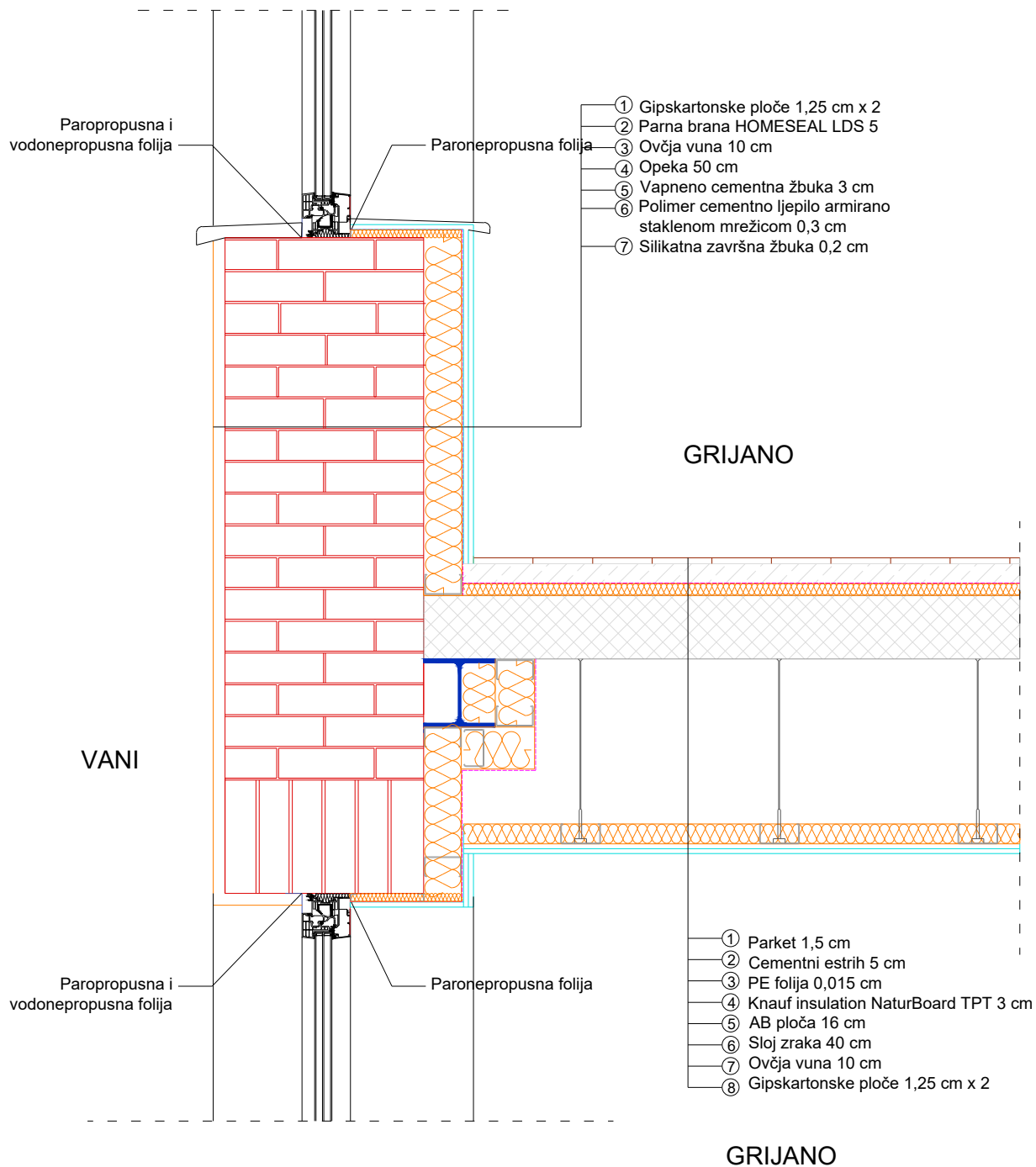
Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu

Predmet: Diplomski rad

Izradila: Anamarija Šuštić

Sadržaj: Detalj 1 - drugi slučaj

Mjerilo: 1:10



Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu

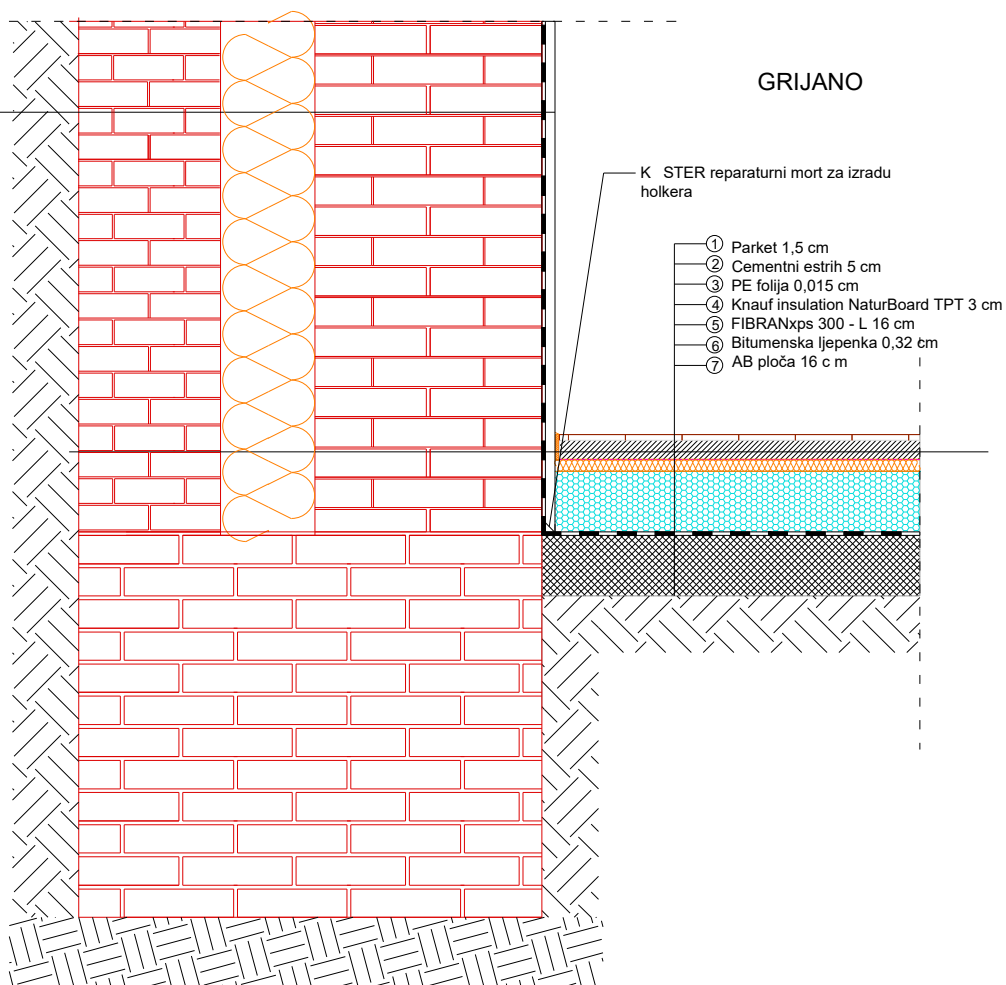
Predmet: Diplomski rad

Izradila: Anamarija Šuštić

Sadržaj: Detalj 2

Mjerilo: 1:10

- ① K STER Sanacijska boja
- ② K STER fina žbuka
- ③ K STER Sanacijska žbuka
- ④ K STER Sanacijski grubi šrić - vezni sloj
- ⑤ K STER KD sustav - brtveni sloj
- ⑥ K STER Pol sil TG 500 - temeljni premaz
- ⑦ Opeka 60 cm
- ⑧ Thermo hite toplinska izolacija 25 cm
- ⑨ Opeka 40 cm



Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu

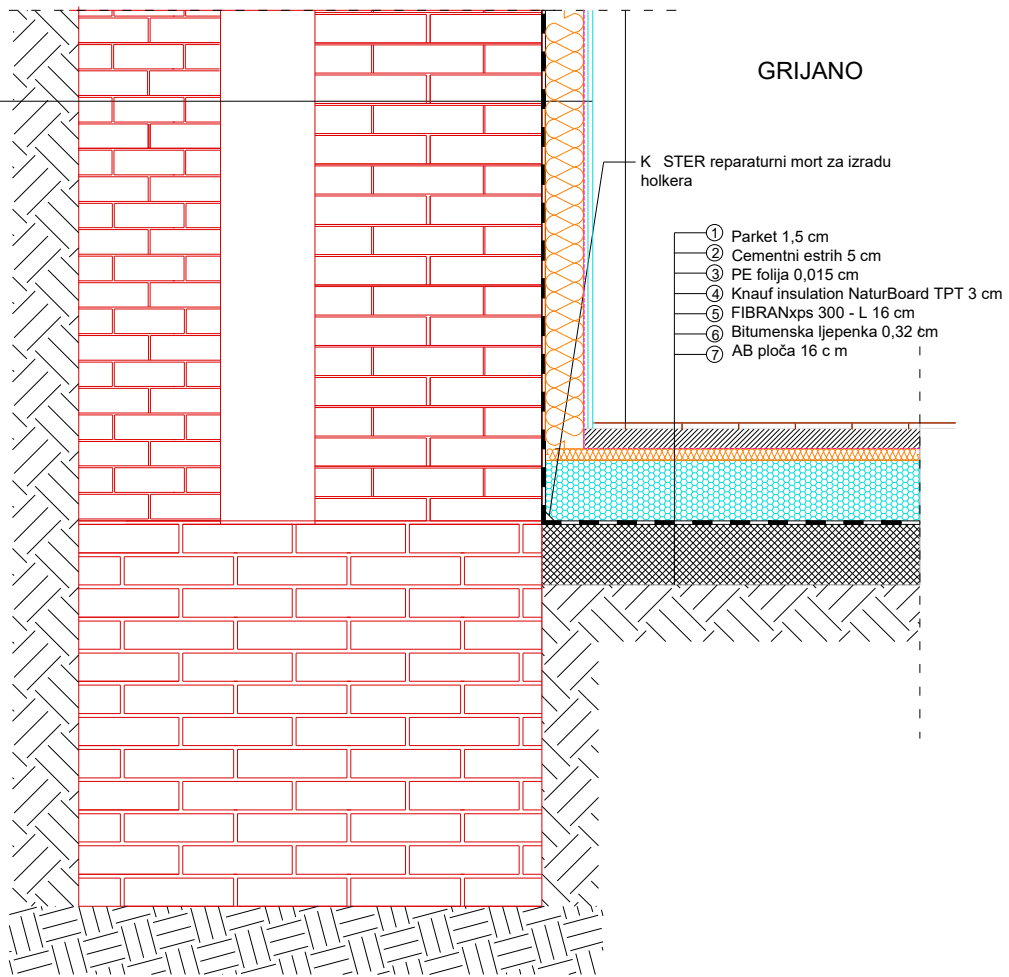
Predmet: Diplomski rad

Izradila: Anamarija Šuštić

Sadržaj: Detalj 3 - prvi slučaj

Mjerilo: 1:10

- ① Gipskartosne ploče 1,25 cm x 2
- ② Parna brana
- ③ Ovjča vuna 10 cm
- ④ Bitumenska hidroizolacija
- ⑤ Opeka 60 cm
- ⑥ Zrak 25 cm
- ⑦ Opeka 40 cm



Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu

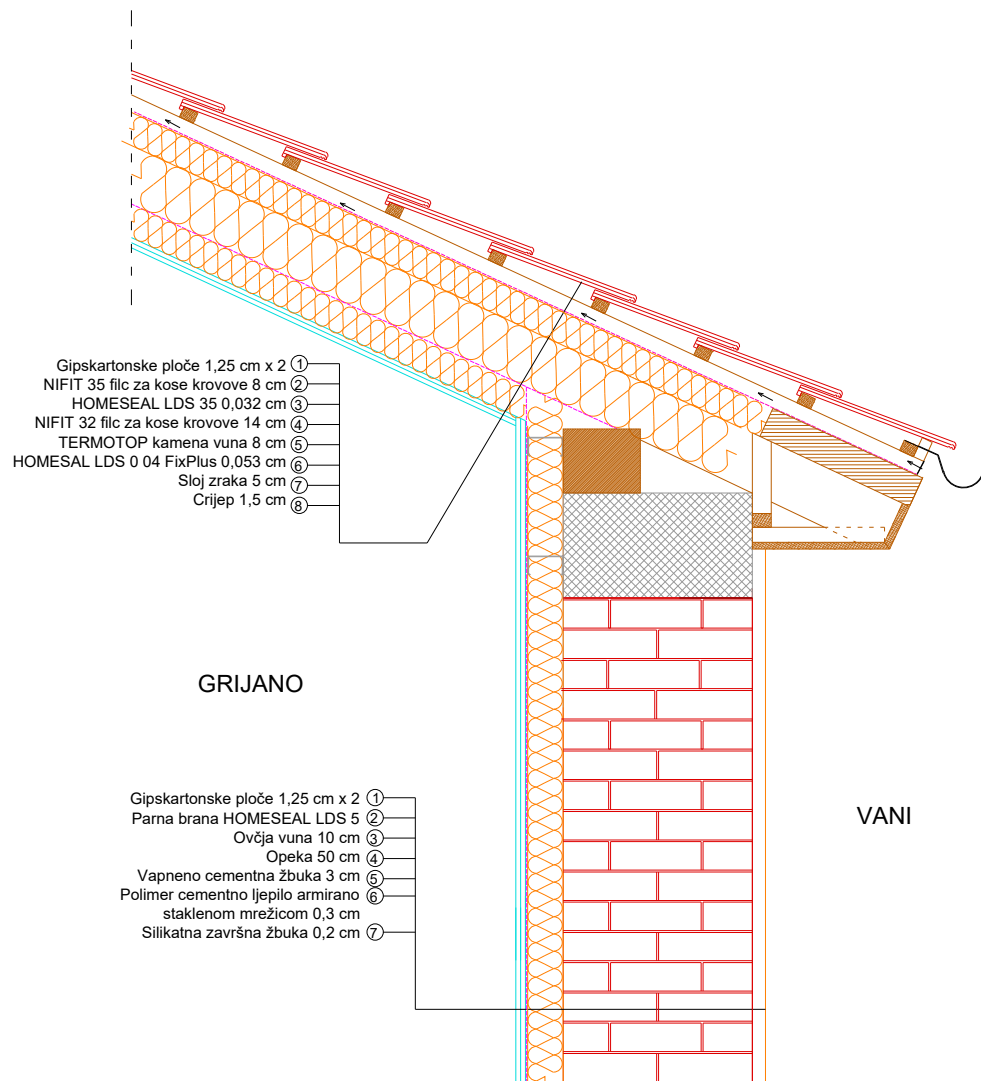
Predmet: Diplomski rad

Izradila: Anamarija Šuštić

Sadržaj: Detalj 3 - drugi slučaj

Mjerilo: 1:10





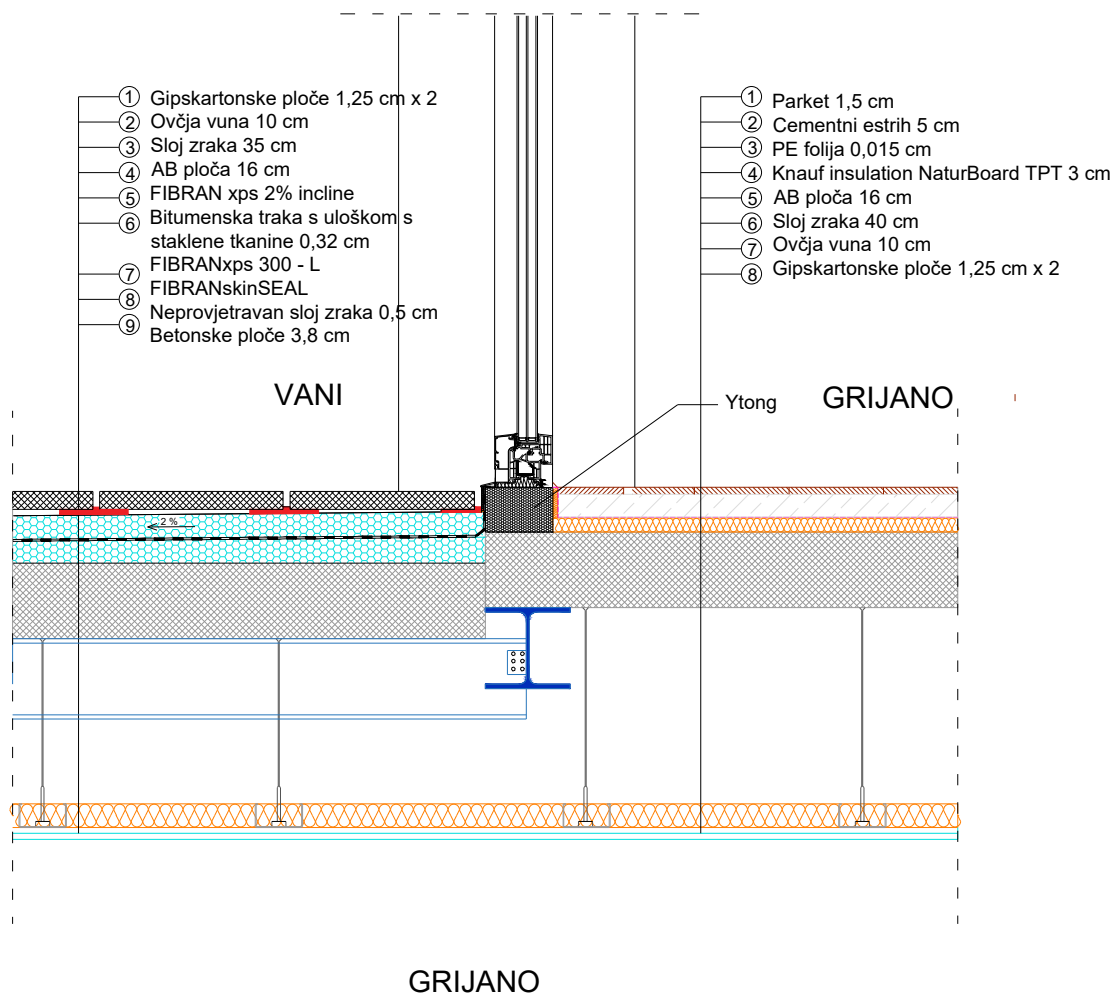
Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu

Predmet: Diplomski rad

Izradila: Anamarija Šuštić

Sadržaj: Detalj 4

Mjerilo: 1:10



Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu	
Predmet:	Diplomski rad
Izradila:	Anamarija Šuštić
Sadržaj:	Detalj 5
Mjerilo:	1:10