

Istraživanje mogućnosti energetske obnove zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada

Vukadin, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:237:802863>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Jelena Vukadin

**Istraživanje mogućnosti energetske obnove
zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Jelena Vukadin

**Istraživanje mogućnosti energetske obnove
zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada**

DIPLOMSKI RAD

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

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Jelena Vukadin

**Investigation of an energy refurbishment
concept of a building located in the historical
area**

MASTER THESIS

Supervisor: dr. sc. Bojan Milovanović, izv. prof.

Zagreb, 2024

ZAHVALE

Iskreno zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Bojanu Milovanoviću, izv. prof., na pomoći i vodstvu pri pisanju ovog diplomskog rada.

Posebno hvala tetki Mariji jer je nepresušan izvor motivacije, Didi jer uvijek mogu računati na nju i Jakovu jer je najveća podrška u svemu što radim.

Od srca zahvaljujem svojim roditeljima što su mi omogućili ovo putovanje, što su bili strpljivi i vjerovali u mene, a prijateljima zahvaljujem što su bili moji suputnici na najljepšem putovanju.

Sve je lakše s vama.

Hvala.

SAŽETAK

U diplomskom radu istražen je potencijal energetske obnove, kao sastavnog dijela sveobuhvatne obnove, oštećene zgrade u urbanoj cjelini Biograda na Moru. Pregledom dostupne literature utvrđena je mogućnost i ograničenja energetske obnove zgrade pod spomeničkom zaštitom te je definiran koncept energetske obnove usmjeren prvenstveno na vanjsku ovojnici zgrade. Na temelju postojećih arhitektonskih podloga, izrađen je BIM model zgrade u programskom paketu Archicad 27. Predložene su mjere energetske obnove zgrade te su analizirane s tri različita aspekta:

- i. Potrebna energija za grijanje i hlađenje do razine zgrade gotovo nulte energije;
- ii. Utjecaj toplinskih mostova;
- iii. Dugoročno higrotermalno ponašanje.

Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje proveden je koristeći satnu metodu proračuna kako je definirano u Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790.

Proračun vrijednosti toplinskih mostova i dugoročnog transporta mase proveden je korištenjem numeričkog modela.

Detaljna analiza difuzije vodene pare provedena je u programskom paketu WUFI 6, koristeći pristup zasnovan na HAM modelima.

Diplomski rad je rezultirao definiranim potencijalom energetske obnove zgrade pod spomeničkom zaštitom, i to u vidu smanjenja potrošnje energije za grijanje i hlađenje, povećanja unutarnje ugodnosti te smanjenja rizika pojave građevinske štete zbog kondenzacije vodene pare.

Ključne riječi: energetska obnova, nZEB, energetska učinkovitost, kulturna baština, modeliranje toplinskih mostova, difuzija vodene pare

SUMMARY

In the master thesis, an energy refurbishment concept, as a component of the comprehensive restoration of a damaged building in the urban area of Biograd na Moru, was investigated. A review of the available literature identified both the possibilities and limitations of energy refurbishment for a building under monument protection, and an energy refurbishment concept was defined, primarily focusing on the building's external envelope. Based on existing architectural plans, a BIM model of the building was created using Archicad 27 software.

The proposed energy refurbishment measures were analyzed from three different perspectives:

- i. The required energy for heating and cooling to achieve a nearly zero-energy building;
- ii. The influence of thermal bridges;
- iii. Long-term hygrothermal behavior.

The calculation of the required energy for heating and cooling was carried out using the hourly method of calculation as defined in the Algorithm for Calculation the Required Energy for Heating and Cooling of Building Space according to HRN EN ISO 13790.

The calculation of thermal bridge values and long-term mass transport was conducted using a numerical model.

A detailed analysis of water vapor diffusion was performed using the WUFI 6 software package, based on approaches grounded in HAM models

The master thesis defined the potential for the energy refurbishment of the building under monument protection, specifically in terms of reducing energy consumption for heating and cooling, increasing indoor comfort, and reducing the risk of building damage due to water vapor condensation.

Keywords: energy refurbishment, nZEB, energy efficiency, cultural heritage, calculation of thermal bridges, water vapor diffusion

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. Uvod.....	1
1.1. Opći i specifični ciljevi rada.....	1
1.2. Struktura rada	2
2. Teorijska podloga.....	4
2.1. Energetska učinkovitost i održivi razvoj.....	6
2.2. Potrošnja energije i energetska bilanca	8
2.2.1. Toplinski dobici.....	9
2.2.2. Toplinski gubici.....	9
2.3. Energetsko certificiranje.....	10
2.4. nZEB.....	12
2.4.1. Osnovni principi projektiranja nZEB-a	16
2.5. Energetska obnova graditeljske baštine.....	25
2.5.1. Mjere energetske obnove kulturne baštine	27
3. Metodologija rada.....	32
4. Zgrada Zavičajnog muzeja Biograd na Moru	34
4.1. Lokacijski uvjeti	34
4.2. Postojeće stanje građevine.....	37
4.2.1. Geometrijske karakteristike zgrade	39
4.2.2. Klimatski podaci.....	42
4.2.3. Toplinski dobici i gubici.....	43
4.2.4. Podaci o termotehničkom sustavu i rasvjeti.....	44
4.2.5. Karakteristike otvora.....	44
4.3. Građevni dijelovi.....	49
4.3.1. Zidovi na granici grijano – vani (GV)	49
4.3.2. Zidovi na granici negrijano – vani (NV).....	52
4.3.3. Pod na tlu.....	54
4.3.4. Međukatne konstrukcije	55

4.3.5.	Krov	56
5.	Rezultati proračuna postojećeg stanja zgrade.....	58
5.1.	Proračun građevnih dijelova	58
5.2.	Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje	59
6.	Mjere energetske obnove zgrade.....	66
6.1.	Zahvati na građevnim dijelovima	67
6.1.1.	Zidovi	67
6.1.2.	Pod na tlu.....	68
6.1.3.	Međukatne konstrukcije	69
6.1.4.	Krov	71
6.2.	Mjere poboljšanja toplinsko-izolacijskih svojstava otvora.....	72
6.3.	Termotehnički sustav.....	72
6.4.	Rasvjeta	74
6.5.	Mehanička ventilacija s rekuperacijom.....	75
6.6.	Fotonapon	75
7.	Rezultati proračuna rekonstrukcije.....	78
7.1.1.	Zidovi na granici grijano – vani (GV)	80
7.1.2.	Zidovi na granici negrijano – vani (NV).....	81
7.1.3.	Pod na tlu.....	83
7.1.4.	Međukatne konstrukcije	83
7.1.5.	Krov	85
7.2.	Usporedba rezultata proračuna postojećeg stanja i rekonstrukcije	91
8.	Proračun toplinskih mostova.....	92
8.1.	Detalj H1	95
8.2.	Detalj H2	97
8.2.1.	Prvi slučaj.....	98
	Drugi slučaj.....	99
8.2.2.	Treći slučaj.....	100
8.3.	Detalj H3	102
8.3.1.	Prvi slučaj.....	103
8.3.2.	Drugi slučaj.....	104
8.3.3.	Treći slučaj.....	105
8.4.	Detalj V1.....	107
8.5.	Detalj V2.....	110

8.6.	Detalj V3.....	112
9.	Utjecaj vlage	115
9.1.	Proračun difuzije vodene pare	116
9.1.1.	Rezultati proračuna zidova.....	121
9.1.2.	Rezultati proračuna krova.....	131
10.	Zaključak	159
	POPIS LITERATURE	161
	POPIS SLIKA.....	165
	POPIS TABLICA.....	171
	PRILOG 1	173

1. UVOD

Energetska učinkovitost je ključna tema današnjice. Oscilacije u cijenama energenata upozorile su na ovisnost gospodarstva o istim. Pojava energetske siromaštva, čija je definicija nedostatak pristupa modernim energetske uslugama i proizvodima, potaknula je dublje razmatranje o važnosti upravljanja energijom, osiguranju energetske sigurnosti i korištenju obnovljivih izvora energije. Planirano i učinkovito upravljanje energijom postalo je temelj za sveukupni razvoj društva, jer bez toga nije moguće postići konkurentnost, energetske i ekonomske stabilnost te održivi razvoj. Važnost energetske pitanja i upravljanja potrošnjom energije prepoznata je i na razini Europske unije, te se kao takva mora uzeti u obzir prilikom planiranja nacionalnih strategija. Značajan doprinos energetske učinkovitosti u zemljama članicama EU bilo je donošenje *Direktive 2012/27/EU o energetske učinkovitosti* [1], kojom su definirane specifične mjere koje zemlje članice moraju usvojiti i provesti kroz svoje nacionalne politike kako bi ostvarile uštede u potrošnji energije.

U današnje vrijeme pitanja održivosti i energetske učinkovitosti postaju sve važnija, a njihov se značaj posebno ističe kada je riječ o očuvanju kulturno-povijesne baštine. Zgrade unutar kulturno-povijesnih cjelina predstavljaju dragocjeni dio nasljeđa koji ne samo da obogaćuje estetiku gradova, već nosi i duboku kulturnu, povijesnu i društvenu vrijednost. Tim više, spomenute zgrade predstavljaju poseban izazov glede energetske obnove jer su u proces uključeni vlasnici i skrbnici kulturnih dobara, projektanti, konzervatori i drugi nositelji pripreme i provedbe projekta energetske obnove (Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost itd.) [2].

U tom kontekstu, predmetni diplomski rad svoju pažnju usmjerava na istraživanje mogućnosti energetske obnove zgrade unutar kulturno-povijesne cjeline grada, na primjeru bivšeg Zavičajnog muzeja Biograd na Moru. Cilj je analizirati kako se mogu primijeniti moderni koncepti energetske održivosti i učinkovitosti na konstrukciju izgrađenu u 19. stoljeću koja je dio zaštićene jezgre grada, čuvajući istovremeno njenu autentičnost i povijesni integritet.

1.1. Opći i specifični ciljevi rada

Ostvarivanje energetske visokoučinkovitog fonda zgrada do 2050. godine jedan je od ključnih ciljeva Europske unije. Ovaj cilj temelji se na *Direktivi 2010/31/EU o energetske učinkovitosti zgrada*, koja nalaže da se nove zgrade grade, a postojeće obnavljaju prema

standardima gotovo nulte energije (nZEB). Nove zgrade trebaju imati vrlo visoku energetska učinkovitost, a energija potrebna za njihovo funkcioniranje trebala bi se većim dijelom dobivati iz obnovljivih izvora. Postizanje ovog cilja uključuje i temeljitu obnovu postojećeg fonda zgrada, kako bi se poboljšala njihova energetska učinkovitost i smanjila potrošnja energije.

Prema *Dugoročnoj strategiji obnove nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske do 2050. godine* [3], u 2020. godini nacionalni fond postojećih zgrada obuhvaćao je ukupnu korisnu površinu od 237 milijuna m², od čega je 178 milijuna m² otpalo na stambene zgrade, dok je 59 milijuna m² obuhvatilo nestambene zgrade. Od ukupnog nacionalnog fonda zgrada u Republici Hrvatskoj, važnu skupinu predstavljaju zgrade izgrađene do sredine 20. st. od kojih znatan dio pripada graditeljskoj baštini, odnosno imaju status zaštićenog kulturnog dobra.

Opći cilj ovoga rada je, kroz analizu relevantne literature i primjera dobre prakse, predložiti optimalnu strategije u procesu energetske obnove zgrade unutar kulturno-povijesne cjeline. Dotaknut će se izazovi i prepreke s kojima se suočavaju stručnjaci u području očuvanja kulturno-povijesne baštine, od inženjera do konzervatora, te će se identificirati praksa za postizanje optimalnog balansa između očuvanja naslijeđa i postizanja energetske učinkovitosti. Ovaj rad nastoji pružiti uvid u kompleksnost i izazove koje donosi proces energetske obnove zgrada unutar kulturno-povijesnih cjelina, no povrh toga ukazati na dobiti istoga, kako u energetske, tako i u kulturnom smislu.

Specifični ciljevi rada su predložene mjere rekonstrukcije Zavičajnog muzeja Biograd na Moru analizirati s tri različita aspekta:

1. Potrebna energija za grijanje i hlađenje zgrade do razine zgrade gotovo nulte energije;
2. Utjecaj toplinskih mostova;
3. Dugoročno higrotermalno ponašanje.

1.2. Struktura rada

Diplomski rad podijeljen je na teorijski i empirijski dio. Kroz deset glavnih poglavlja istražena je mogućnost energetske obnove zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada, raspravljene su potencijalne prepreke, te su predloženi alati za prevladavanje istih.

U *Uvodnom* je dijelu prezentiran istraživački problem, te opći i specifični ciljevi rada. Teorijskim aspektima energetske učinkovitosti, održivog razvoja, energetskim

certificiranjem, nZEB-om, te izazovima energetske obnove kulturne baštine bavi se drugo poglavlje *Teorijska podloga*. U *Metodologiji istraživanja* prikazan je metodološki okvir diplomskog rada, te je detaljnije objašnjen tijek i logika istraživanja. Poglavlje *Zgrada Zavičajnog muzeja Biograd na Moru* obuhvaća detaljan opis predmetne zgrade, od lokacijskih i klimatskih uvjeta do postojećih građevnih dijelova, otvora, termotehničkih sustava itd. *Rezultati proračuna postojećeg stanja zgrade* i *Rezultati proračuna rekonstrukcije* daju, kako im i sam naziv kaže, pregled proračuna energetske svojstva postojećeg stanja i stanja nakon rekonstrukcije s dodijeljenim energetske razredom za oba proračuna. Njihova kratka usporedba dana je u potpoglavlju *Usporedba postojećeg stanja i rekonstrukcije*. U poglavlju *Proračun toplinskih mostova* analizirana su potencijalna područja povećanog toplinskog toka na vanjskoj ovojnici zgrade, dok je u poglavlju *Utjecaj vlage* proveden proračun difuzije vodene pare koji daje uvid u dugoročno higrotermalno ponašanje rekonstruirane zgrade Zavičajnog muzeja u Biogradu na Moru. Rasprava rezultata integrirana je u svako poglavlje koje čini empirijski dio ovoga diplomskog rada. Sinteza istog dana je u poglavlju *Zaključak*.

2. TEORIJSKA PODLOGA

Postoji više podjela energije, a najpoznatija podjela je na obnovljivu i neobnovljivu energiju. Pod obnovljivim izvorima energije podrazumijeva se sunčeva energija, energija vode, energija vjetra, geotermalna energija, biomasa i bioplin, odnosno nepresušni izvori energije. Neobnovljivi izvori energije također se crpe iz prirode, no ne mogu se regenerirati i količinski su ograničeni. Svi sektori gospodarstva, pa tako i građevinarstvo u najvećoj su mjeri ovisni o neobnovljivim izvorima energije. Pretjerana eksploatacija ugljena, nafte i prirodnog plina dovela je do osjetnog smanjenja njihovih zaliha, a time i do neodrživosti dosadašnjih energetske politika temeljenih na fosilnim gorivima. Osim nestašice energenata, izgaranjem fosilnih goriva dolazi do emisije CO₂ u atmosferu što doprinosi efektu staklenika koji je globalna prijetnja.

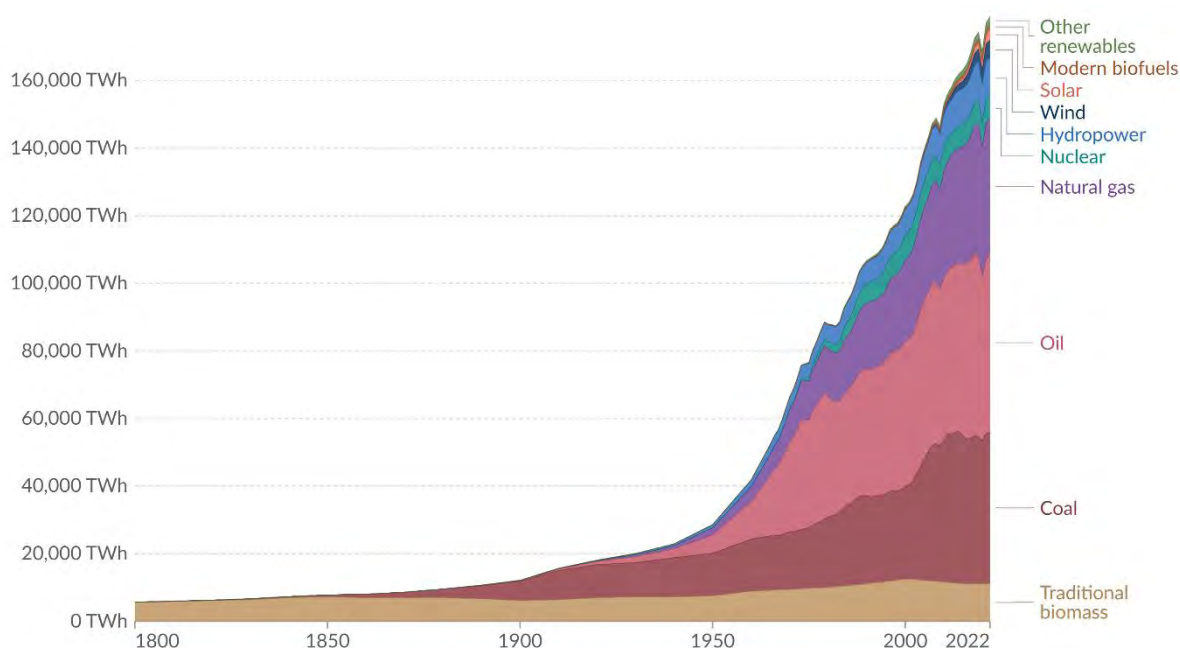
Praćenje potrošnje energije promatra se s dva aspekta: primarna i konačna potrošnja energije.

Primarna potrošnja energije odnosi se na ukupnu količinu energije koja se koristi u svom izvornom obliku prije nego što prođe kroz bilo kakvu transformaciju ili distribuciju u energetske sustavu. Uključuje sve izvore energije koji se koriste, kao što su fosilna goriva (nafta, ugljen, prirodni plin), nuklearna energija, obnovljivi izvori (solarna, energija vjetra, hidroenergija), kao i energija iz biomase.

Konačna energija je tzv. energija krajnjih korisnika ili isporučena energija, a odnosi se na energiju koju stvarni potrošači koriste za različite namjene, poput grijanja, hlađenja, osvjetljenja, industrijske proizvodnje, transporta i slično. Ista je već prošla kroz različite faze obrade i transformacije, te je dostupna krajnjem korisniku u obliku električne energije, plina, topline i drugih oblika energije koji se koriste u svakodnevnom životu i radu. Potrošnja energije krajnjih korisnika mjeri se nakon svih gubitaka u transformaciji i distribuciji, te predstavlja stvarnu energiju koja se koristi za zadovoljenje potreba korisnika.

Od industrijske revolucije do danas potrošnja primarne energije u rastućoj je putanji (Slika 1). Rastuća potrošnja energije kroz stoljeća, dominacija određenih izvora energije poput fosilnih goriva, i sve veća ovisnost društva i gospodarstva o energiji stvorili su potrebu za promjenom smjera prema održivijem energetske sustavu. Na razini Europske unije, kao odgovor na tri ključna izazova s kojima se Europa suočava, 2015. godine donesen je dokument pod nazivom „*Strategija energetske unije*“. Ova strategija ima za cilj adresirati sljedeće izazove:

1. *Klimatske promjene*: Glavni cilj je smanjenje emisije CO₂ i postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine, što podrazumijeva prelazak na obnovljive izvore energije, poboljšanje energetske učinkovitosti, te razvoj novih tehnologija za smanjenje emisija stakleničkih plinova.
2. *Energetsku ovisnost*: Kako bi se osigurala energetska stabilnost, EU teži smanjenju ovisnosti o uvozu energije s vanjskih tržišta, što uključuje diversifikaciju izvora energije, poticanje domaće proizvodnje energije, te razvoj održivih i lokalnih izvora energije.
3. *Sve stariju infrastrukturu*: Modernizacija energetskog tržišta i infrastrukture ključna je za osiguranje energetske sigurnosti i konkurentnosti. Ova komponenta strategije obuhvaća usklađivanje nacionalnih cijena energije, poboljšanje prekograničnih energetskih mreža, te poticanje inovacija i digitalizacije u energetskom sektoru. [4]



Slika 1. Ukupna potrošnja primarne energije u svijetu prema izvoru od 1800. do 2022. godine [5]

Strategijom energetske unije teži se osigurati dostupna, čista, i stabilna energija za sve građane Europske unije, uz istovremeno stvaranje održivog energetskog rasta. Međutim, unatoč naporima za povećanje energetske učinkovitosti i proizvodnje energije iz obnovljivih izvora unutar EU, proizvodnja primarne energije nije dovoljna da zadovolji rastuću potražnju. Prema podacima iz 2018. godine, gotovo 58% dostupne energije u EU potječe iz uvoza, što

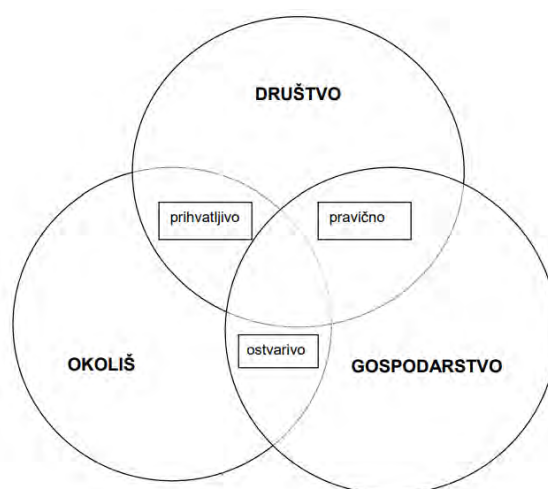
ukazuje na značajnu ovisnost Unije o vanjskim dobavljačima. Rusija je bila glavni dobavljač ključnih energenata poput prirodnog plina, sirove nafte, te kamenog ugljena. [6]

U procesu prelaska na niskougličnu ekonomiju, ključno je uskladiti postojeće energetske potrebe s imperativom očuvanja zaliha fosilnih goriva i smanjenja emisija stakleničkih plinova. U tom kontekstu, energetska učinkovitost ističe se kao najisplativiji i najefikasniji alat za postizanje tih ciljeva.

2.1. Energetska učinkovitost i održivi razvoj

Prema Brundtland izvješću Svjetske komisije za okoliš i razvoj 1987. godine „Naša zajednička budućnost“, održivi razvoj je definiran kao „razvoj koji zadovoljava potrebe današnjice bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje vlastite potrebe“. Nastoji uravnotežiti gospodarski i socijalni napredak i „zdravlje“ ljudi i okoliša. Dakle, cilj je spriječiti ugrožavanje budućih naraštaja trošenjem neobnovljivih izvora i zagađivanjem okoliša te osigurati održivo korištenje prirodnih izvora na nacionalnoj i međunarodnoj razini. [7]

Drugim riječima, cilj održivog razvoja je trojak – teži gospodarskoj učinkovitosti (ekonomskom razvoju), društvenoj odgovornosti (socijalnom napretku) i zaštiti okoliša (Slika 2). Riječ je o stupovima održivog razvoja koji su u međusobnoj interakciji i ne mogu samostalno stajati jedan bez drugoga. Zemljini resursi su društvu neophodni za preživljavanje, ekonomski modeli u određenoj mjeri poboljšavaju kvalitetu života, a budući da ekonomijom upravlja društvo, jasno je kako je i sama ekonomija ovisna o prirodi. [8]



Slika 2. Tri sastavnice održivog razvoja [7]

U Republici Hrvatskoj *Zakonom o energetskej učinkovitosti* [9] energetska učinkovitost se definira kao „odnos između ostvarenog korisnog učinka i energije potrošene za ostvarenje tog učinka“.

Energetska učinkovitost je najdjelotvorniji način postizanja ciljeva održivog razvoja. Doprinosi smanjenju emisija štetnih plinova u okoliš, većoj industrijskoj konkurentnosti, otvaranju novih radnih mjesta i povećanju sigurnosti opskrbe energijom. Pojednostavljeno, energetska učinkovitost sugerira uporabu manje količine energije za obavljanje istog posla (grijanje ili hlađenje prostora, rasvjetu, proizvodnju itd.).

Bitno je razlikovati termin energetske učinkovitosti od termina štednje ili suzdržavanja od trošenja energije. Ušteda energije koja je rezultat odricanja potrošnje znači uštedu u potrošnji energije koja je ostvarena nižom kvalitetom energetske usluge npr. smanjivanje razine termostata, postavljanje ograničenja potrošnje na uređajima itd. Energetska učinkovitost ne podrazumijeva odricanje, već osiguranje jednakovrijedne kvalitete usluga, ali uz manje utrošene energije. Dakle, krajnji korisnik dobiva jednaku kvalitetu proizvoda ili usluga uz manji utrošak energije. [10]

Sektor zgradarstva ima velik potencijal za smanjenje potrošnje energije povećanjem energetske učinkovitosti, što potvrđuje *Direktiva 2010/31/EU o energetskej učinkovitosti zgrada*. Razlozi zbog kojih zgrade imaju značajan potencijal za energetske uštede uključuju [10]:

- Zgrade su najveći pojedinačni potrošač energije u EU.
- Približno 40 % potrošnje energije u EU i 36 % emisije stakleničkih plinova potječe iz zgrada.
- Oko 35 % zgrada u EU ima više od 50 godina.
- Gotovo 75 % građevinskog fonda ima nisku energetske učinkovitost.
- Oko 85-95 % postojećih zgrada bit će i dalje u upotrebi do 2050. godine.

Trenutno je poznato šest smjernica za izgradnju objekata koje uzrokuju višestruke uštede energije [11]:

1. Pasivne kuće,
2. Niskoenergetske kuće,
3. Pametne kuće,
4. Autonomne kuće,
5. Kuće s viškom energije i
6. Kuće nulte energije.

Kada se razvijaju mjere za poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada s najlošijim svojstvima, važno je identificirati koje zgrade imaju najlošije energetske karakteristike, što je moguće postići na dva načina: određivanjem praga, poput energetskog razreda temeljenog na potrošnji primarne energije (izraženog u kWh/m²), ili usmjeravanjem pozornosti na zgrade izgrađene prije određenog datuma. [12]

Za poboljšanje učinkovitosti potrošnje nije dovoljna samo primjena tehničkih rješenja. Neophodna je edukacija ljudi koji će se učinkovitom tehnologijom i tehničkom opremom služiti na najučinkovitiji mogući način. Energetske učinkovitosti nema bez svijesti ljudi i volje za promjenom navika prema energetski učinkovitim rješenjima.

2.2. Potrošnja energije i energetska bilanca

Potrošnja energije u zgradama ovisi o brojnim čimbenicima, a jedan od njih je i namjena zgrade. Zgrade se dijele na stambene i nestambene zgrade. Stambena zgrada označava obiteljsku kuću ili višestambenu zgradu koja je u cijelosti ili u kojoj je više od 90 % građevinske (bruto) površine namijenjeno za stanovanje. Nestambena zgrada definirana je kao zgrada koja nema niti jednu stambenu jedinicu ili skup prostorija namijenjen stanovanju zajednica. Primjer nestambenih zgrada su: uredski prostori, komercijalni prostori, obrazovni objekti, zdravstveni objekti, vjerski objekti. [13]

U nestambenim zgradama, energija se troši za grijanje, hlađenje, zagrijavanje tople vode, uređaje, ventilaciju i rasvjetu. Najveći dio energije ipak, kako u nestambenim tako i u stambenim zgradama, troši se za grijanje prostora. U Republici Hrvatskoj, toplinska energija čini najveći dio konačne potrošnje energije. U kontinentalnom dijelu Hrvatske, taj udio prosječno iznosi 80 %, dok u primorskom dijelu iznosi oko 51 %.

Energetska bilanca predstavlja količinu energije potrebnu za zadovoljavanje svih toplinskih potreba zgrade. Zbroj energije proizvedene termotehničkim sustavima u zgradi i dobivene energije (npr. sunce) mora biti jednak toplinskim gubicima zgrade kako bi bili očuvani uvjeti toplinske ugodnosti. Pojednostavljeno, ravnoteža dobitaka i gubitaka predstavlja ekvivalent ugodi. Energetski učinkovite zgrade uspijevaju zadržati jednaku razinu ugodnosti, a da pritom troše znatno manje energije.

$$Q + Q_{sun} + Q_{in} = Q_{gg} + Q_{ven} + Q_{trans}$$

Lijeva strana jednakosti predstavlja toplinske dobitke, a desna toplinske gubitke:

Q – primarna energija goriva korištenog za grijanje prostora,

Q_{sun} – dobivena solarna toplinska energija,

Q_{in} – dobivena unutarnja toplinska energija,

Q_{gg} – gubici nastali u sustavu grijanja,

Q_{ven} – gubici u sustavu ventilacije,

Q_{trans} – transmisijski gubici.

2.2.1. Toplinski dobici

Ukupni toplinski dobici računaju se prema formuli [14]:

$$Q_{H,gn} = Q_{sol} + Q_{int} [kWh]$$

gdje su:

Q_{sol} – solarni toplinski dobici;

Q_{int} – toplinski dobici od ljudi i uređaja.

Solarni toplinski dobici pripadaju urbanističkim mjerama projektiranja zgrada. Pasivna solarna energija se nastoji iskoristiti u svrhu povećanja topline unutar zgrade tijekom zimskih mjeseci, s mogućnošću redukcije tijekom ljetnih mjeseci, što je moguće postići pravilnom orijentacijom zgrade.

Na solarne toplinske dobitke utječe površina, vrsta i orijentacija ostakljenih otvora. Što je veći otvor, kroz njega prolazi više solarne energije. U proračun se uzimaju upadni kut sunčevih zraka, zaklonjenost zgrade od susjednih zgrada ili stabala, te sjenila za zaštitu od sunčeva zračenja (rolete, grilje itd.).

Unutarnji dobici od ljudi i uređaja, između ostalog rasvjete, također emitiraju određenu količinu topline.

2.2.2. Toplinski gubici

Gubici energije nastaju zbog nesavršenosti sustava.

Gubici sustava grijanja Q_{gg} nastaju zbog korištenja goriva koje nije moguće u potpunosti iskoristiti.

Gubici u sustavu ventilacije Q_{ven} postoje zbog provjetravanja i ventilacije zgrade gdje se sa svakom izmjenom zraka u zgradi dio energije prenosi na okolinu. Uzrokovani su infiltracijom vanjskog zraka, prirodnim provjetravanjem i mehaničkom ventilacijom. Infiltracija je posljedica strujanja zraka kroz nebrtvljene otvore iz područja više temperature prema području niže temperature. Što je gradijent temperature veći, izmjena temperature će biti brža. Toplinski gubici čiji je uzrok infiltracija, mogu se izbjeći odnosno otkloniti izvedbom

zrakonepropusne ovojnice, što s druge strane zahtjeva često provjetravanje kako bi se vlaga unutarnjeg prostora zadržala na prihvatljivoj razini. Gledajući s energetskog aspekta, potonje je daleko od idealnoga, stoga je u visokoenergetskim zgradama nužna ugradnja mehaničke ventilacije uz rekuperaciju topline. [14]

$$H_{Ve} = H_{Ve,inf} + H_{Ve,win} + H_{H(C),Ve,mech} [W/K]$$

$H_{Ve,inf}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije vanjskog zraka;

$H_{Ve,win}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora;

$H_{H,Ve,mech}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije / klimatizacije kod zagrijavanja zraka;

$H_{C,Ve,mech}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije / klimatizacije kod hlađenja zraka.

Transmisijski gubici Q_{trans} rezultat su nesavršenosti toplinske izolacije objekta zbog čega se kroz vanjske zidove, prozore, podove i krovove dio energije rasipa u okolinu. Oni ovise o karakteristikama materijala korištenim u izgradnji, kvaliteti toplinske izolacije, stolarije i sl. Pravilno projektirana i izvedena ovojnica ključna je za smanjivanje transmisijskih gubitaka koji su dominantni. „Pravilno“ podrazumijeva neprekinutu zrakonepropusnu i toplinsku kontinuiranu izolaciju vanjskih zidova, poda na tlu, krovišta, stropova i zidova prema negrijanom prostoru. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti rješenju i izvedbi detalja toplinskih mostova, o čemu će biti govora u nastavku.

2.3. Energetsko certificiranje

Energetsko certificiranje zgrada provodi se s ciljem utvrđivanja njihovih energetskih svojstava. U Republici Hrvatskoj, energetsko certificiranje obavezno je za zgrade javne namjene s ukupnom korisnom površinom većom od 250 m², nove zgrade prije izdavanja uporabne dozvole (osim ako Pravilnik ne propisuje drugačije), te zgrade koje se prodaju, iznajmljuju ili daju u zakup (engl. *leasing*). [13]

Certifikat o energetskoj učinkovitosti, prema *Direktivi o energetskoj učinkovitosti zgrada* za utvrđivanje energetskih svojstava zgrade, glavno je mjerilo koliko učinkovito zgrada troši energiju. Energetsko certificiranje predstavlja „skup radnji i postupaka koji se provode u svrhu izdavanja energetskog certifikata te uključuje: energetski pregled zgrade, potrebne proračune za referentne klimatske podatke za iskazivanje specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje, specifične godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje, specifične godišnje

isporučene energije, specifične godišnje primarne energije, specifične godišnje emisije CO₂, određivanje energetske razreda zgrade, izradu energetske certifikata". [13]

Energetski certifikat predstavlja „zdravstvenu“ iskaznicu zgrade koja sadrži: „opće podatke o zgradi, energetske razred zgrade, rok važenja certifikata, podatke o osobi koja je izdala i izradila energetske certifikat, podatke o osobama koje su sudjelovale u izradi energetske certifikata, oznaku energetske certifikata, podatke o termotehničkim sustavima, energetske potrebe zgrade, podatke o korištenju obnovljivih izvora energije, prijedlog mjera, detaljnije informacije i objašnjenje sadržaja energetske certifikata". [13] Energetski certifikat daje dva važna podatka o potrošnji energije zgrade: energetske razred zgrade označen slovom (A+, A, B, C, D, E, F, G) s podatkom o specifičnoj godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje za referentne klimatske podatke izraženoj u kWh/(m²a) te energetske razred zgrade označen slovom (A+, A, B, C, D, E, F, G) s podatkom o specifičnoj godišnjoj primarnoj energiji, E_{prim} izraženoj u kWh/m²a.

Energetski razred grafički se prikazuje na energetske certifikatu zgrade slovom (A+, A, B, C, D, E, F, G) s podatkom o specifičnoj godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje za referentne klimatske podatke izraženoj u kWh/m²a i određuje se prema Tablica 1.

Tablica 1. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje za referentne klimatske podatke [13]

Energetski razred	$Q''_{H,nd,ref}$ – specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke u kWh/(m ² a)
A+	≤ 15
A	≤ 25
B	≤ 50
C	≤ 100
D	≤ 150
E	≤ 200
F	≤ 250
G	> 250

Energetski razred grafički se prikazuje na energetske certifikatu zgrade slovom s podatkom o specifičnoj godišnjoj primarnoj energiji, E_{prim} izraženoj u kWh/m²a te se definira prema Tablica 2.

Tablica 2. Specifična godišnja primarna energija, E_{prim} izražena u kWh/m²a [13]

E_{del} (kWh/m ² a)	STAMBENA		OBITELJSKA		UREDSKA		OBRAZOVNA		BOLNICA		HOTEL I RESTORAN		SPORTSKA DVORANA		TRGOVINA		OSTALE NE-STAMBENE	
	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P
A+	≤ 45	≤ 35	≤ 40	≤ 30	≤ 20	≤ 15	≤ 45	≤ 25	≤ 145	≤ 190	≤ 65	≤ 40	≤ 145	≤ 95	≤ 105	≤ 90	≤ 45	≤ 35
A	> 45 ≤ 65	> 35 ≤ 50	> 40 ≤ 60	> 30 ≤ 40	> 20 ≤ 30	> 15 ≤ 30	> 45 ≤ 55	> 25 ≤ 45	> 145 ≤ 185	> 190 ≤ 205	> 65 ≤ 80	> 40 ≤ 45	> 145 ≤ 215	> 95 ≤ 100	> 105 ≤ 200	> 90 ≤ 130	> 45 ≤ 65	> 35 ≤ 50
B	> 65 ≤ 80	> 50 ≤ 60	> 60 ≤ 80	> 40 ≤ 50	> 30 ≤ 40	> 30 ≤ 40	> 55 ≤ 60	> 45 ≤ 60	> 185 ≤ 220	> 205 ≤ 220	> 80 ≤ 90	> 45 ≤ 50	> 215 ≤ 290	> 100 ≤ 110	> 200 ≤ 290	> 130 ≤ 170	> 65 ≤ 80	> 50 ≤ 60
C	> 80 ≤ 165	> 60 ≤ 120	> 80 ≤ 175	> 50 ≤ 120	> 40 ≤ 120	> 40 ≤ 125	> 60 ≤ 120	> 60 ≤ 100	> 220 ≤ 320	> 220 ≤ 235	> 90 ≤ 155	> 50 ≤ 105	> 290 ≤ 410	> 110 ≤ 165	> 290 ≤ 330	> 170 ≤ 180	> 80 ≤ 170	> 60 ≤ 115
D	> 165 ≤ 250	> 120 ≤ 170	> 175 ≤ 270	> 120 ≤ 190	> 120 ≤ 195	> 125 ≤ 205	> 120 ≤ 180	> 100 ≤ 140	> 320 ≤ 420	> 235 ≤ 250	> 155 ≤ 220	> 105 ≤ 155	> 410 ≤ 525	> 165 ≤ 220	> 330 ≤ 370	> 180 ≤ 200	> 170 ≤ 255	> 115 ≤ 170
E	> 250 ≤ 310	> 170 ≤ 210	> 270 ≤ 340	> 190 ≤ 240	> 195 ≤ 245	> 205 ≤ 255	> 180 ≤ 225	> 140 ≤ 175	> 420 ≤ 525	> 250 ≤ 315	> 220 ≤ 275	> 155 ≤ 195	> 525 ≤ 655	> 220 ≤ 275	> 370 ≤ 465	> 200 ≤ 220	> 255 ≤ 320	> 170 ≤ 215
F	> 310 ≤ 370	> 210 ≤ 250	> 340 ≤ 400	> 240 ≤ 280	> 245 ≤ 290	> 255 ≤ 300	> 225 ≤ 270	> 175 ≤ 210	> 525 ≤ 630	> 315 ≤ 370	> 275 ≤ 330	> 195 ≤ 230	> 655 ≤ 790	> 275 ≤ 330	> 465 ≤ 555	> 220 ≤ 265	> 320 ≤ 385	> 215 ≤ 255
G	> 370	> 250	> 400	> 280	> 290	> 300	> 270	> 210	> 630	> 370	> 330	> 230	> 790	> 330	> 555	> 265	> 385	> 255

Energetski razredi kreću se od oznake A+ što označava da je zgrada energetski vrlo učinkovita do oznake G koja označava energetski najlošija svojstva zgrade.

Energetski certifikat igra ključnu ulogu u vođenju energetske politike vezanih uz potrošnju energije u zgradama. Njegova dvostruka funkcija je prikazivanje energetske učinkovitosti zgrade i informiranje korisnika o njezinim energetske svojstvima, te pružanje baze podataka za planiranje, provedbu i nadzor ušteda energije i smanjenja emisije CO₂, kao i za razvoj strategija i mjera u građevinskom sektoru. [10]

Neupitna je važnost energetske certificiranja i certifikata u oblikovanju nacionalnih energetske politike za sektor zgradarstva i postizanje ciljeva uštede energije. Međutim, često se događa da se očekivana potrošnja energije prema energetske certifikatu razlikuje od stvarne potrošnje, što može uzrokovati paradoks u potrošnji energije, jer značajna odstupanja između proračunskih i stvarnih vrijednosti mogu dovesti do pogrešaka u planiranju energetske obnove i očekivanim uštedama.

2.4. nZEB

EU teži drastičnom smanjenju emisija stakleničkih plinova koji doprinose klimatskim promjenama. Iako je najpoznatiji staklenički plin ugljični dioksid (CO₂), i drugi plinovi, iako prisutni u manjim količinama, mogu imati snažniji učinak na zagrijavanje.

Staklenički plinovi djeluju poput stakla u staklenicima: zadržavaju sunčevu toplinu i sprječavaju njezin povratak u svemir, čime se stvara efekt staklenika koji povećava temperaturu Zemlje. Iako su mnogi staklenički plinovi prirodno prisutni u atmosferi, ljudske aktivnosti doprinose njihovom povećanju što stvara efekt staklenika, mijenja klimu planeta

i uzrokuje promjene u obrascima snijega i padalina, porasta prosječnih temperatura te ekstremnih klimatskih događaja kao što su toplinski valovi i poplave.

Prema Zakonu EU-a o klimi, postavljeni su pravno obvezujući ciljevi za smanjenje emisija stakleničkih plinova; do 2030. godine treba ih smanjiti za 55 posto u odnosu na razine iz 1990. godine. Također, EU se obvezuje da će do 2050. godine postići nultu neto emisiju stakleničkih plinova, odnosno klimatsku (ugljičnu) neutralnost. [15]

Zgrade su veliki pojedinačni potrošači energije i zagađivači okoliša. Procjenjuje se da su u Europskoj uniji zgrade odgovorne za 40% potrošnje energije i 36% emisije CO₂, zbog čega su postavljeni novi kriteriji za njihovu gradnju. [16]

Zgrada gotovo nulte energije odnosno nZEB (engl. *nearly Zero Energy Building*) je zgrada vrlo visokih energetske svojstava. Koristi vrlo nisku količinu energije, koja se u značajnoj mjeri dobiva energijom iz obnovljivih izvora uključujući onu koja se proizvodi na samoj zgradi ili u njezinoj blizini. Gradnja zgrada gotovo nulte energije uvelike doprinosi postizanju klimatske neutralnosti.

Prednosti nZEB-a u odnosu na ostale zgrade [16]:

- doprinosi očuvanju klime te koristi obnovljive izvore energije (sunca, vode, tla, zraka itd.) za svoje energetske potrebe,
- projektirana je prema specifičnim klimatskim i lokacijskim uvjetima, s mogućim najpovoljnijim oblikom zgrade za uštedu energije, te relativne orijentacije prema suncu kojom može povećavati ili ograničavati količinu sunčeve svjetlosti i topline,
- ima znatno niže troškove za korištenje energije,
- minimalno 30% godišnje isporučene energije se proizvodi iz obnovljivih izvora energije na samoj zgradi ili u njezinoj blizini, i u slučaju kad je najmanje 60% godišnje isporučene energije za rad tehničkih sustava u zgradi podmiro iz učinkovitog sustava centraliziranog grijanja, odnosno učinkovitog sustava ima znatno niže troškove za korištenje energije,
- sadrži energetske vrlo učinkovite sustave za zagrijavanje/hlađenje svježeg/filtriranog zraka bez vanjskih zagađivača, prašine i alergena, izuzetne ugone zraka, a radi čega nema ni zdravstvenih problema, niti potrebe za čestim čišćenjem,
- koristi pametne tehnologije upravljanja tehničkim sustavima zgrade, dakle automatizacije i upravljanja zgradom, podešavanja i nadzora, za tehničke sustave ili njihove dijelove,

- za njenu gradnju se primjenjuju optimalni standardni ili najsuvremeniji građevni materijali i elementi, te s ciljem korištenja onih koji zadovoljavaju kriterije zelene i održive gradnje (kružnog gospodarstva),
- zahtijeva manje održavanja i ima duži životni vijek nego ostale, jer su građevni materijali i uređaji pažljivije odabrani i ugrađeni,
- osigurana su rješenja za kontrolu insolacije, osunčavanja unutrašnjosti zgrade (korištenja upada sunčevih zraka), te treba biti pažljivo projektirana da koristi prirodnu dnevnu svjetlost za energetske potrebe prema principima projektiranja pasivne kuće,
- koristi energetske učinkovite potrošače električne energije (uređaje i rasvjetu),
- razina buke u interijeru je vrlo niska jer ima vrlo dobro izolirane zidove, zgrada je odgovarajuće zrakopropusnosti, te ima adekvatnu stolariju (obzirom na tražene karakteristike i način ugradbe),
- potrošnja vode je manja, jer je zgrada opremljena kontrolama protoka vode na izljevnim mjestima, ima spremnike za kišnicu te ima neprekidno toplu vodu,
- višak proizvedene energije se može koristiti za punjenje električnih automobila, bicikala ili dodatnih električnih uređaja,
- pametna je investicija u slučaju prodaje, jer je sagrađena prema najsuvremenijim zahtjevima, te uz male troškove, i veliku klimatsku udobnost koju pruža, će postizati više cijene na tržištu nekretnina,
- vrhunskog dizajna, vrhunske tehnologije, visoke energetske učinkovitosti i održivosti, nZEB sigurno znači zadovoljstvo vlasnika da ima zgradu budućnosti. (Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, 2024.)

Pri projektiranju i izgradnji stambenih te nestambenih zgrada uredske, obrazovne, bolničke, hotelske i restoranske namjene, potrebno je osigurati da godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje po jedinici korisne površine zgrade ($Q''_{c,nd}$) ne prelazi $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Za nestambene zgrade, kao što su uredske i obrazovne ustanove, bolnice, hoteli i restorani, kod kojih udio prozorske površine u ukupnoj površini pročelja prelazi 30 %, $Q''_{c,nd}$ mora biti manji ili jednak $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Dodatno, ako je izračunata vrijednost primarne energije (E_{prim}) za zgradu barem 20 % niža od maksimalno dopuštenih vrijednosti prema Tehničkom propisu [17], smatra se da su zadovoljeni zahtjevi za $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{c,nd}$ prema tom propisu. Pored ovih zahtjeva za $Q''_{H,nd}$ i E_{prim} , zahtjevi za zgrade gotovo nulte energije (nZEB) su također određeni i:

- minimalnim udjelom isporučene energije koja se podmiruje iz obnovljivih izvora energije, pri čemu najmanje 30 % godišnje isporučene energije zgrade treba biti osigurano iz obnovljivih izvora,

- ispunjavanjem zahtjeva o zrakopropusnosti, što se potvrđuje ispitivanjem na zgradi prije tehničkog pregleda.

Važno je imati na umu da se kod proračuna E_{prim} u Hrvatskoj ne uzimaju u obzir svi tehnički sustavi (Tablica 5).

Tablica 3. Najveće dopuštene vrijednosti za nove zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hladene na temperaturu 18 °C ili višu [17]

ZAHITJEVI ZA NOVE ZGRADE i GOEZ	$Q''_{H,nd}$ [kWh/(m ² ·a)]						E_{prim} [kWh/(m ² ·a)]			
	NOVA ZGRADA i GOEZ						NOVA		GOEZ	
	kontinent, $\theta_{mm} \leq 3$ °C			primorje, $\theta_{mm} > 3$ °C			kont $\theta_{mm} \leq 3$ °C	prim $\theta_{mm} > 3$ °C	kont $\theta_{mm} \leq 3$ °C	prim $\theta_{mm} > 3$ °C
KATEGORIJA ZGRADE	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$				
Višestambena	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_0$	45,99	120	90	80	50
Obiteljska kuća	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$17,16 + 38,42 \cdot f_0$	57,50	115	70	45	35
Uredska	16,94	$8,82 + 40,58 \cdot f_0$	51,43	16,19	$11,21 + 24,89 \cdot f_0$	37,34	70	70	35	25
Obrazovna	11,98	$3,86 + 40,58 \cdot f_0$	46,48	9,95	$4,97 + 24,91 \cdot f_0$	31,13	65	60	55	55
Bolnica	18,72	$10,61 + 40,58 \cdot f_0$	53,21	46,44	$41,46 + 24,89 \cdot f_0$	67,60	300	300	250	250
Hotel i restoran	35,48	$27,37 + 40,58 \cdot f_0$	69,98	11,50	$6,52 + 24,89 \cdot f_0$	32,65	130	80	90	70
Sportska dvorana	96,39	$88,28 + 40,58 \cdot f_0$	130,89	37,64	$32,66 + 24,91 \cdot f_0$	58,82	400	170	210	150
Trgovina	48,91	$40,79 + 40,58 \cdot f_0$	83,40	13,90	$8,92 + 24,91 \cdot f_0$	35,08	450	280	170	150
Ostale nestambene	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_0$	45,99	150	100	/	/

Tablica 4. Najveće dopuštene vrijednosti za postojeće grijane i/ili hladene zgrade na temperaturu 18 °C ili višu prilikom rekonstrukcije [17]

ZAHITJEVI – RE-KONSTRUKCIJA	$Q''_{H,nd}$ [kWh/(m ² ·a)]					
	kontinent, $\theta_{mm} \leq 3$ °C			primorje, $\theta_{mm} > 3$ °C		
KATEGORIJA ZGRADE	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$
Višestambena	50,63	$40,49 + 50,73 \cdot f_0$	93,75	27,00	$21,59 + 27,06 \cdot f_0$	50,00
Obiteljska kuća	50,63	$40,49 + 50,73 \cdot f_0$	93,75	27,00	$19,24 + 38,82 \cdot f_0$	60,00
Uredska	21,18	$11,03 + 50,73 \cdot f_0$	64,29	17,60	$12,19 + 27,06 \cdot f_0$	40,60
Obrazovna	14,98	$4,84 + 50,73 \cdot f_0$	58,10	10,81	$5,40 + 27,06 \cdot f_0$	33,83
Bolnica	23,40	$13,26 + 50,73 \cdot f_0$	66,51	50,48	$45,06 + 27,06 \cdot f_0$	73,48
Hotel i restoran	44,35	$34,21 + 50,73 \cdot f_0$	87,48	12,50	$7,09 + 27,06 \cdot f_0$	35,50
Sportska dvorana	120,49	$110,35 + 50,73 \cdot f_0$	163,61	40,91	$35,50 + 27,06 \cdot f_0$	63,93
Trgovina	61,14	$50,99 + 50,73 \cdot f_0$	104,25	15,11	$9,71 + 27,06 \cdot f_0$	38,13
Ostale nestambene	50,63	$40,49 + 50,73 \cdot f_0$	93,75	27,00	$21,59 + 27,06 \cdot f_0$	50,00

Tablica 5. Definirani tehnički sustavi za proračun isporučene i primarne energije [18]

	Vrsta zgrade	SUSTAV GRIJANJA	SUSTAV HLADENJA	SUSTAV PRIPREME PTV-a	SUSTAV MEH. VENTILACIJE I KLIMATIZACIJE	SUSTAV RASVJETE
1	Obiteljske kuće	DA	NE	DA	Uzima se u obzir ukoliko postoji	NE
2	Višestambene zgrade	DA	NE	DA		NE
3	Uredske zgrade	DA	DA	NE		DA
4	Zgrade za obrazovanje	DA	NE	NE		DA
5	Bolnice	DA	DA	DA		DA
6	Hoteli i restorani	DA	DA	DA		DA
7	Sportske dvorane	DA	DA	DA		DA
8	Zgrade trgovine	DA	DA	NE		DA
9	Ostale nestambene zgrade	DA	NE	NE		DA

2.4.1. Osnovni principi projektiranja nZEB-a

Za postizanje što niže potrošnje energije u zgradama, ključno je projektirati ih s ciljem minimiziranja energetske potrebe. Ne postoji univerzalno rješenje za postizanje standarda nZEB. Umjesto toga, potreban je koordiniran i integriran pristup svih struka uključenih u projektiranje zgrade, uključujući arhitekta, stručnjake za fiziku zgrade, termotehničke sustave i elektroinstalacije. Potrebno je obuhvatiti sve faze, od koncepta i idejnog projekta do izvedbenog projekta, uz stručnu i pažljivo kontroliranu izvedbu. Kvalitetno optimiziran energetski koncept omogućava postizanje niske potrošnje energije i korištenje obnovljivih izvora energije uz minimalne investicijske troškove, što rezultira troškovno-optimalnim rješenjem koje zadovoljava nZEB standard.

Za postizanje standarda nZEB, važno je projektirati zgradu s povoljnim faktorom oblika i uskladiti je s bioklimatskim uvjetima. Treba primijeniti najpovoljnije materijale, elemente i toplinsku izolaciju, projektirati detalje s minimalnim toplinskim mostovima i osigurati nisku zrakopropusnost. Također, treba uključiti rješenja za kontrolu insolacije, koristiti prirodno svjetlo, predvidjeti mehaničku ventilaciju s rekuperacijom i implementirati termotehničke sustave visoke učinkovitosti ili s visokim udjelom obnovljivih izvora energije.

Cijena značajno utječe na izbor materijala za vanjsku ovojnicu zgrade i tehničkih sustava. Iako je moguće postići nZEB standard s vrlo skupim tehnologijama i materijalima, cilj zakonodavne regulative nije samo doseći ovaj standard, već to učiniti uz troškovno optimalna rješenja. To znači odabrati ekonomski opravdane, tehnički izvedive, održive i ekološki prihvatljive opcije.

Još jedan ključan parametar u projektiranju nZEB-a je povećana razina udobnosti stanovanja. To uključuje osiguranje odgovarajuće kvalitete zraka u prostoru, što se, posebno u zrakonepropusnim zgradama nZEB-a, može postići samo primjenom mehaničke ventilacije s preporučenom rekuperacijom topline iz otpadnog zraka. Također, važno je

održati dovoljnu unutarnju površinsku temperaturu građevinskih elemenata (kao što su prozori i zidovi) kako bi se izbjegao osjećaj hladnoće, kondenzacija vodene pare te moguća građevinska oštećenja uzrokovana rošenjem.

Općenito se može govoriti o **pet osnovnih principa projektiranja** zgrade gotovo nulte energije (nZEB) [19]:

1. toplinska izolacija – neprekinuta toplinska izolacija optimalne debljine
2. prozori odgovarajućih toplinskih karakteristika (U_w) i svojstava propuštanja Sunčeve energije (g_{\perp})
3. mehanička ventilacija s rekuperacijom topline – radi osiguranja optimalne kvalitete zraka u prostoru (koncentracije CO₂)
4. zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade – radi smanjenja gubitaka topline, smanjenja mogućnosti pojave građevinske štete unutar i na površini građevnih dijelova zgrade, smanjenja razine buke, osiguranja učinkovitog rada mehaničke ventilacije
5. minimiziranje toplinskih mostova – smanjenje gubitaka topline, smanjenje rizika od pojave građevinske štete.

2.4.1.1. Toplinska ovojnica kod nZEB-a

Vanjsku ovojnicu zgrade čine građevni dijelovi koji predstavljaju fizičku barijeru između unutarnjeg kondicioniranog prostora i vanjskog okoliša te nekondicioniranog unutarnjeg prostora zgrade. Ona uključuje neprozirne elemente poput poda, zidova i krova, kao i prozirne dijelove poput prozora i vrata. Glavna uloga vanjske ovojnice je osigurati zdravu i ugodnu unutarnju klimu za korisnike zgrade, što uključuje kvalitetu zraka, toplinsku ugodnost, akustičnu zaštitu i vizualni dojam.

Kada je riječ o poduzimanju mjera vezanih za očuvanje topline i poboljšanje vanjske ovojnice, bitan faktor predstavlja toplinska provodljivost materijala, što se posebice odnosi na neprozirne građevne dijelove, s obzirom da je kod njih prijenos topline vođenjem (kondukcijom) dominantan.

Prijenos topline kondukcijom ili vođenjem se događa kod krutih, tekućih i plinovitih tvari, a karakterizira ga prijenos topline molekularnim gibanjem. To znači da do prijenosa topline kondukcijom dolazi zbog brzog kretanja ili vibracije atoma i molekula koji u kontaktu sa susjednim atomima i molekulama izazivaju prijenos topline na iste. Veličina kojom se iskazuje sposobnost materijala da prenosi toplinu kondukcijom naziva se koeficijent toplinske provodljivosti (λ). Koeficijent toplinske provodljivosti ovisi o volumnoj masi, tj. poroznosti, kemijskom sastavu materijala, sadržaju vlage i temperaturi materijala. Dakle,

ima i vrlo varijabilne i promjenjive vrijednosti pa se tako može dogoditi da isti materijal ima različit koeficijent toplinske provodljivosti pri promjeni različitih uvjeta okoline ili njega samoga. [20]

Materijali koji imaju nizak koeficijent toplinske provodljivosti zovu se toplinsko-izolacijski materijali. Građevinski materijali kojima je primarna uloga konstruktivna (najčešće beton, opeka ili čelik), pri racionalnim debljinama uglavnom nemaju dostatnu otpornost provođenju topline, tj. dovode do većih toplinskih gubitaka, pa ukoliko nisu potpomognuti toplinsko-izolacijskim materijalima, pomoću njih nije moguće ostvariti nZEB standard.

Suprotno čestom laičkom mišljenju, povećanje debljine toplinske izolacije ne vodi nužno proporcionalnom smanjenju U-vrijednosti (recipročne toplinskoj provodljivosti) pojedinih građevnih dijelova, kao ni smanjenju godišnjih toplinskih gubitaka zgrade ili troškova energije.

Općenito se može reći da debljina konvencionalnih proizvoda za toplinsku izolaciju (EPS, mineralna vuna i sl.) iznad 20 do 25 cm prestaje imati značajan utjecaj na uštedu energije za grijanje. Za gradnju je moguće odabrati različite tipologije i tehnologije dostupne na tržištu:

- drvo (drveni okvir, CLT, TJI/FJI, ...) + toplinska izolacija,
- pjeno i plinobeton + toplinska izolacija,
- čelična konstrukcija + toplinska izolacija,
- zidana (ili armirano betonska) konstrukcija + ETICS,
- izolirana oplata za beton (ICF), itd.

Tehničkim propisom definirani su maksimalni dopušteni koeficijenti prolaska topline kroz građevne dijelove, koji ovise o referentnoj klimi. Međutim, ispunjavanje dopuštenih koeficijenata ne osigurava automatski zadovoljenje zahtjeva za potrebnu energiju za grijanje ili hlađenje. U slučajevima nepovoljne orijentacije, složene dispozicije ili potrebe za čestom izmjenom zraka, moguće je postavljanje debljih slojeva izolacije kako bi se zadovoljile granične vrijednosti potrebne energije za grijanje.

U toplijim krajevima Hrvatske veća debljina toplinske izolacije zahtijevat će znatno povećanu potrebu energije za hlađenje zgrade, što ukazuje na važnost pronalaska optimuma koji daje minimalan zbroj potrebne energije za grijanje i hlađenje određene zgrade. Zbog toga je približno 15 cm maksimalna debljina toplinske izolacije u mediteranskoj klimi za koju se može naći tehničko ili ekonomsko opravdanje, a optimalna debljina je između 5 i 10 cm [19].

Najčešće korišteni toplinsko-izolacijski materijali mogu se podijeliti u dvije skupine: anorganske i organske. U anorganske materijale spadaju kamena i mineralna vuna. Njihove

vrijednosti koeficijenta provodljivosti kreću se od 0,035 do 0,050 W/(mK). Glavne prednosti su im otpornost na starenje i truljenje te značajnija požarna otpornost u odnosu na organske materijale. Organski toplinsko-izolacijski materijali mogu se podijeliti na prirodne i umjetne materijale. U svakodnevnoj upotrebi su uglavnom zastupljeni umjetni organski materijali i to ekspanzirani polistiren (EPS) i ekstrudirani polistiren (XPS). Njihov koeficijent toplinske provodljivosti kreće se od 0,030 do 0,040 W/(mK). Karakterizira ih paronepropusnost, a XPS ima i veću tlačnu čvrstoću te ne upija vodu. Prirodni organski materijali koji su rjeđe u upotrebi su celuloza, drvena vlakna, pluto itd.

Važno je spomenuti još i specijalne toplinsko-izolacijske materijale. Uglavnom se koriste u slučajevima kada je debljina toplinske izolacije ograničena zbog posebnih zahtjeva pa se, s obzirom na izrazito nisku vrijednost toplinske provodljivosti, s relativno malim debljinama mogu postići znatne uštede energije. Takav proizvod je npr. aerogel čiji je koeficijent toplinske provodljivosti oko 0,020 W/(mK) te vakuumske izolacijske ploče čiji je koeficijent toplinske provodljivosti čak 0,005 W/(mK).

Ispravan odabir materijala za slojeve građevnih dijelova zgrade treba zadovoljiti niz zahtjeva koji se odnose na toplinsku ovojnici, uključujući: zaštitu od požara, smanjenje toplinskih mostova, osiguranje zrakonepropusnosti, kontrolu vlage (kroz rješenja za difuziju vodene pare – paronepropusna ili paropropusna), te odvodnju likvidne vlage. Uz to, materijali trebaju ispunjavati i druge zahtjeve, kao što su zaštita od buke, konstrukcijska stabilnost, ekološka prihvatljivost, estetski kriteriji, te ekonomičnost i kvaliteta izvođenja.

2.4.1.2. Zrakonepropusnost vanjske ovojnice

Zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade odnosi se na otpor prolasku unutarnjeg toplog zraka iz zgrade ili ulasku hladnog vanjskog zraka kroz pukotine, šupljine i druge nenamjerne propuste u građevnim dijelovima, ali ne uključuje ventilacijski sustav zgrade. Ovaj nepoželjni prolazak zraka poznat je kao infiltracija, a uzrokovan je razlikom tlaka s obje strane vanjske ovojnice koja nastaje uslijed razlike u temperaturi zraka, pritiska vjetra i djelovanja mehaničkog ventilacijskog sustava.

Obvezno dokazivanje zadovoljavanja zahtjeva zrakonepropusnosti ispitivanjem odnosi se na nZEB zgrade i one koje su projektirane za: $Q''_{H,nd} \leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ u kontinentalnoj klimi i $Q''_{H,nd} \leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ u primorskoj klimi. Pri razlici tlakova od 50 Pa, izmjereni broj izmjena zraka (n_{50}) ne smije prelaziti $3,0 \text{ h}^{-1}$ za zgrade bez mehaničkog sustava ventilacije, odnosno $1,5 \text{ h}^{-1}$ za zgrade s mehaničkim sustavom ventilacije. n_{50} predstavlja broj izmjena zraka unutar jednog sata pri razlici tlakova od 50 Pa u odnosu na obujam unutarnjeg zraka [17].

Zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade je ključna, ne samo zbog toplinskih gubitaka (iako može značajno utjecati), već prvenstveno zbog smanjenja rizika od kondenzacije vodene pare unutar građevnih dijelova zgrade. U nZEB zgradama, svjež zrak se osigurava putem mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline (povratom topline).

Nepoželjne posljedice zrakopropusnih zgrada su [19]:

- povećani toplinski gubici,
- kondenzacija vodene pare,
- manja učinkovitost mehaničkih sustava ventilacije (u odnosu na rekuperaciju topline),
- smanjenje zvučne izolacije vanjske ovojnice zgrade,
- narušena kvaliteta unutarnjeg zraka.

Zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade gotovo nulte energije (nZEB) moguće je ostvariti pravilnim izvođenjem i brtvljenjem [19]:

- specijaliziranih proizvoda poput specijaliziranih traka i folija (membrana),
- specijaliziranih tekućih membrana, kitova,
- ožbukano žiđa (bez pukotina na žbuci i prodora za instalacije),
- armiranobetonskog zida (bez pukotina i prodora za instalacije),
- nekih vrsta OSB ploča ako su one ispitane i klasificirane u razred 3 ili 4 (prema seriji norme HRN EN 300) i imaju debljinu veću od 18 mm,
- specijaliziranim elementima za izvođenje prodora instalacija,
- ugradnjom prozora prema RAL smjernicama itd.

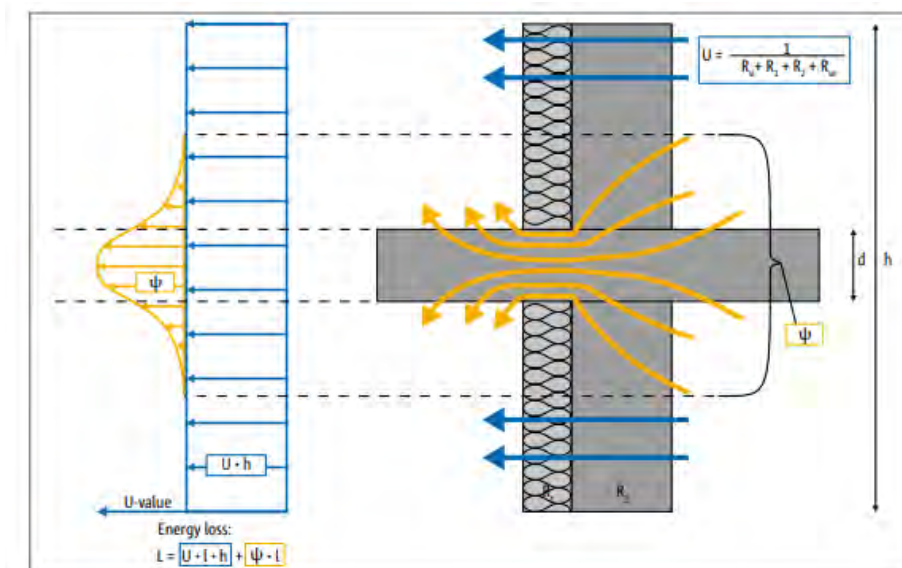
Potrebno je razlikovati paronepropusnu ovojnicu zgrade, koja sprječava difuziju vodene pare, i zrakonepropusnu ovojnicu, koja sprječava infiltraciju zraka. Zrakonepropusna vanjska ovojnicu zgrade ne dopušta strujanje zraka, ali ne mora nužno sprječavati difuziju vodene pare; može biti i paropropusna (primjerice, vapneno-cementna žbuka). Nasuprot tome, paronepropusna ovojnicu (poznata i kao parna brana), koja je istovremeno paronepropusna i zrakonepropusna, poput aluminijske folije, sprječava i difuziju vodene pare i infiltraciju zraka.

2.4.1.3. Toplinski mostovi kod nZEB-a

Toplinski most je ograničeno područje u ovojnici zgrade gdje je tok topline povećan zbog promjene u materijalu, debljini građevnog dijela ili njegovoj geometriji (Slika 3).

Zgrada treba biti projektirana i izgrađena tako da minimizira utjecaj toplinskih mostova na godišnju potrebu za grijanjem i hlađenjem te da spriječi građevinsku štetu u obliku unutarnje

ili površinske kondenzacije u uvjetima korištenja prostora. Utjecaj toplinskog mosta prikazuje se kao povećanje ili smanjenje toplinskog toka na specifičnom detalju. Linijski toplinski mostovi označavaju se oznakom Ψ (psi), a mjerna jedinica je $W/(m \cdot K)$. Točkasti toplinski mostovi označavaju se oznakom χ (hi), a mjerna jedinica je W/K .



Slika 3. Schematski prikaz povećanog toplinskog toka zbog promjene materijala i geometrije građevnog dijela [21]

Od 2006. godine do danas, bilježi se trend povećanja debljine toplinskih izolacija na građevnim dijelovima zgrada, što rezultira smanjenjem transmisivskih gubitaka topline. Međutim, zbog ovog trenda relativno se povećava udio toplinskih mostova u ukupnim transmisivskim gubicima topline. Nažalost, rješenja za zaštitu područja toplinskih mostova nisu razvijena u skladu s tim, što je često posljedica nedostatka znanja kod projektanata, izvođača i/ili investitora. [19]

Toplinske mostove nije moguće potpuno eliminirati iz vanjske ovojnice zgrade. Postojat će bez obzira na debljinu toplinske izolacije. Međutim, prilikom projektiranja i gradnje zgrada gotovo nulte energije (nZEB), ključno je primijeniti načelo izbjegavanja toplinskih mostova ili maksimalno smanjenje njihova utjecaja. To podrazumijeva korištenje svih ekonomski prihvatljivih tehničkih i tehnoloških rješenja kako bi se smanjio njihov utjecaj na energetske učinkovitost zgrade.

U nZEB zgradama postoji povećan rizik od orošavanja ako toplinski mostovi nisu primjereno riješeni, odnosno ako je unutarnja površinska temperatura preniska. Taj rizik je dodatno povećan u zgradama na nZEB razini koje nemaju mehaničku ventilaciju, jer visoka relativna vlažnost unutar zgrade može doprinijeti kondenzaciji na hladnim površinama.

2.4.1.4. Toplinska masa zgrade

Pri odabiru sustava gradnje za nZEB zgrade, važno je uzeti u obzir i „toplinsku masu“ zgrade, odnosno toplinsku inerciju i akumulaciju topline. Akumulacija topline odnosi se na sposobnost građevnih dijelova i materijala da apsorbiraju, pohrane i potom postepeno oslobađaju toplinu u okolinu kada temperatura opadne. Ovo svojstvo je posebno važno tijekom zimskih mjeseci kada grijanje nije kontinuirano, već se prekida, primjerice, tijekom noći. Zahvaljujući akumuliranoj toplini, temperatura zraka u prostorijama može ostati stabilna čak i kada sustav grijanja nije aktivan.

Količina topline koja se može akumulirati ovisi o temperaturnoj razlici između građevnog elementa i zraka, kao i o specifičnom toplinskom kapacitetu i masi elementa. Da bi se postigla veća akumulacija topline, materijale s većom specifičnom masom treba postaviti na unutarnju, topliju stranu višeslojnih građevnih dijelova. Drugim riječima, kako bi se iskoristila toplinska masa, toplinsku izolaciju vanjske ovojnice treba postaviti s vanjske strane zgrade.

2.4.1.5. Prozori i optimalni solarni dobici

Prozori su neizostavan i poželjan element svakog prostora, ključan za ugodan život. Omogućuju značajne doprinose dobrobiti korisnika zgrade, poput sunčeve svjetlosti, svježeg zraka, zaštite od buke, toplinske izolacije, zaštite od sunca i oborina te sigurnosti. Zbog svoje složene toplinske funkcije, prozori imaju značajan utjecaj na energetske bilancu nZEB-a.

Prozori obično imaju niži otpor prolasku topline (veću U_w -vrijednost) u usporedbi s izoliranim zidovima ili krovovima, što ih čini ključnim u prijenosu topline kroz vanjsku ovojnicu zgrade. Na primjer, U_w vrijednost kvalitetnog prozora preporučenog za nZEB iznosi približno $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, dok U vrijednost vanjskog zida iznosi oko $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, što je pet puta manja vrijednost, što znači da su transmisijski gubici topline kroz zidove pet puta manji nego kroz prozore, čime prozori imaju veći udio u ukupnim gubicima topline. [19]

Istodobno, prozirnost prozora omogućuje ulazak sunčeve svjetlosti i topline u zgradu, što može pozitivno utjecati na smanjenje potrebne energije za grijanje zimi, ali može povećati potrebnu energiju za hlađenje ljeti. Stoga, potrebna energija za grijanje i hlađenje zgrade značajno ovisi o:

- vrsti i veličini ostakljenja,

- orijentaciji prozora,
- postojanju ili nepostojanju sustava zasjenjenja.

Optimalna energetska bilanca prozora je temeljni zahtjev nZEB-a – treba pronaći optimum koji daje energetske ravnoteže i u zimskom i u ljetnom razdoblju.

Uravnoteženje toplinskih gubitaka i toplinskih dobitaka kroz prozore postiže se razmatranjem U_w -vrijednosti prozora (definira transmisivne gubitke topline) i g_{\perp} -vrijednosti stakla (definira solarne dobitke topline) koji su dva najvažnija faktora koji utječu na godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrade.

Na prvu nezamjetna, ali zapravo značajna komponenta prozora koja ima veliki utjecaj je rub stakla. Ova komponenta održava razmak između dva stakla i regulira vlažnost u međuprostoru. U kombinaciji s butilnim brtvama, rub stakla osigurava brtvljenje koje sprječava isparavanje plinova poput argona, ksenona ili kriptonu iz međuprostora stakala. Ovi plinovi igraju ključnu ulogu u postizanju niže U_g -vrijednosti ostakljenja, što poboljšava toplinsku izolaciju prozora.

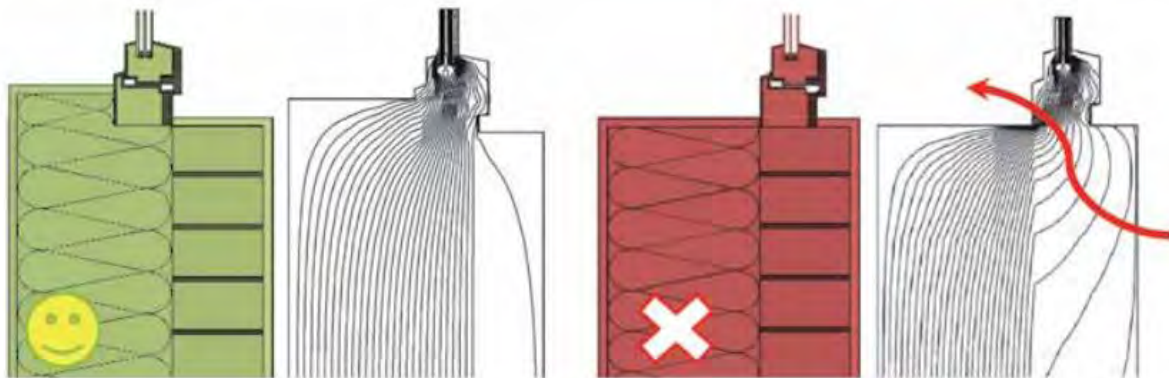
Dvostruko izo-staklo trenutno je najčešća vrsta stakla u postojećim zgradama, ali trostruko izo-staklo postaje sve popularnije, osobito u novim zgradama koje moraju ispunjavati standard gotovo nulte energije (nZEB).

Kod jednostrukog stakla i dvostrukih stakala punjenih zrakom bez Low-e premaza, toplinski gubici znatno nadmašuju toplinske dobitke. S druge strane, kod izo-stakala s Low-e premazima i ispunom od plemenitih plinova, toplinski dobitci premašuju toplinske gubitke. Low-e premaz smanjuje sunčeve toplinske dobitke samo u maloj mjeri, ali značajno smanjuje toplinske gubitke. Također, zamjena zraka u međuprostoru s argonom, ksenonom ili kriptonom dodatno smanjuje toplinske gubitke bez smanjenja solarnih dobitaka. Stoga, za postizanje optimalnih energetske performansi prozora potrebna je pažljiva optimizacija ovih čimbenika.

Npr. dvoslojno izo-staklo na jugu i trostruko izo-staklo na sjevernim prozorima u nekim bi slučajevima bili optimalni za nZEB. Iznimno je važno ovdje napomenuti da je ugradnja prozora ključna! Prozori vrlo dobrih svojstava mogu biti dobri samo ako su ispravno ugrađeni. Ugradnja prozora mora riješiti nekoliko ključnih problema [19]:

- nosivost,
- vodonepropusnost,
- zrakonepropusnost,
- kontroliranje prolaska vodene pare,
- minimizirati utjecaj toplinskih mostova.

Važno je da prozor bude ugrađen u sloju toplinske izolacije i da je fiksni okvir prozora po mogućnosti potpuno prekriven izolacijom (Slika 4). U pravilu bi debljina izolacije koja pokriva okvir trebala biti približno 6 cm.



Slika 4. Prikaz ugradnje prozora u sloj toplinske izolacije (lijevo) i lošeg načina ugradnje prozora na nosivi dio zida bez prekrivanja okvira (desno) [22]

Pravilna ugradnja vanjske stolarije ima značajan utjecaj na postizanje zadovoljavajuće zrakonepropusnosti vanjske ovojnice zgrade. Ugradnja prema RAL smjernicama, poznata kao "RAL ugradnja" [23], uključuje tri razine brtvljenja: unutarnju paronepropusnu brtvu ili parnu branu, ekspandirajuću traku ili pjenu, i vanjsku brtvu ili paropropusnu foliju. Parna brana i paropropusna folija su elastične trake koje dugotrajno sprječavaju prolazak zraka kroz reške između okvira prozora i zida. Špaleta, na koju se parna brana lijepi, mora biti ožbukana, ravna i očišćena kako bi osigurala maksimalnu učinkovitost brtvljenja.

Neadekvatna ugradnja prozora može dovesti do povećanih gubitaka topline, kako ventilacijskih zbog loše zrakonepropusnosti, tako i transmisivskih zbog toplinskih mostova. Također, može uzrokovati građevinske štete i neugodan boravak u prostoru, manifestirajući se kroz strujanje hladnog zraka kroz spojeve između okvira prozora i zida, te pojavu gljivica i plijesni, koje su štetne za zdravlje.

2.4.1.6. Mehanička ventilacija s rekuperacijom topline

Mehanička ventilacija s povratom topline je sustav koji omogućuje da se svježi zrak izvana upuhuje u grijani prostor, a da se pritom većina topline zadrži u grijanom prostoru. Ovakvom vrstom sustava postiže se konstantna opskrba unutarnjeg prostora filtriranim svježim zrakom te se istovremeno održava kvaliteta zraka uz gotovo neprimjetni rad samog sustava.

Ventilacija s povratom topline funkcionira na principu da kupi i ispuhuje unutarnji zrak iz prostorija u kojima ljudi borave te ga pomoću toplinskog izmjenjivača izmjenjuje sa svježim vanjskim zrakom na način da se izmjena zraka odvija uz minimalne toplinske gubitke. Ovakav princip funkcionira i u zimskim uvjetima, odnosno u slučaju kada je vanjska temperatura niža nego unutarnja, i u ljetnim uvjetima, odnosno kada je vanjska temperatura viša nego unutarnja.

Problem u zgradama s dobro hermetički zatvorenim vanjskim ovojnica nastaje iz razloga što prilikom svakodnevnih radnji kao što su kuhanje, tuširanje ili glačanje dolazi do porasta vlažnosti zraka unutar grijanih prostorija. Takav zrak, ukoliko ne dođe do ventilacije samih prostorija, osim što može dovesti do stvaranja kondenzata, znatno narušava kvalitetu stanovanja, prvenstveno zato što je takav zrak pogodan za stvaranje bakterija, gljivica, plijesni i sličnih organizama koje mogu biti štetne po ljudsko zdravlje. Da bi se to spriječilo, potrebno je prozračiti prostorije u kojima se boravi. Ukoliko se ta radnja izvrši otvaranjem prozora, doći će do stvaranja znatnijih energetske potreba zato što je ulaskom većih količina vanjskog zraka potrebno više energije kako bi se temperatura unutarnjeg prostora održala konstantnom. Koristeći mehaničku ventilaciju s povratom topline postiže se efektivna izmjena zraka bez potrebe da se unutarnji prostor ponovo zagrijava ili hladi, ovisno o godišnjem dobu koje se promatra.

Sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline podrazumijeva:

- Uštedu kod grijanja zimi i hlađenja prostora ljeti,
- Otklanjanje prisutnosti kondenzirajuće vlage i plijesni,
- Otklanjanje iskorištenog zraka zasićenog ugljičnim dioksidom,
- Dovođenje svježeg zraka koji ima pozitivan utjecaj na raspoloženje i zdravlje.

2.5. Energetska obnova graditeljske baštine

Od ukupnog nacionalnog fonda zgrada u Republici Hrvatskoj, važnu skupinu predstavljaju zgrade izgrađene do sredine 20. st. od kojih znatan dio pripada graditeljskoj baštini, odnosno imaju status zaštićenog kulturnog dobra. Ministarstvo kulture jedan je od ključnih aktera u poticanju i provedbi mjera energetske učinkovitosti istih, te je u tu svrhu izradilo *Preporuke za primjenu mjera energetske učinkovitosti na graditeljskoj baštini*, [2], koje su namijenjene davanju jasne informacije o ocjeni i unapređenju energetske stanja kulturne baštine na temelju vrednovanja i očuvanja svojstava kulturnog dobra, kroz procedure i kriterije usklađene sa *Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara*.

Postupak energetske obnove zgrade započinje preliminarnom analizom energetske svojstava zgrade i procjenom njezinih energetske potencijala, nakon čega slijedi izrada prijedloga energetske obnove. Ovaj prijedlog temelji se na izvedenom energetskom pregledu zgrade, Izvješću o energetskom pregledu i energetskom certifikatu zgrade, s kojima bi svi dionici trebali biti upoznati prije izrade glavnog projekta.

Važno je napomenuti da se sve mjere energetske učinkovitosti ne mogu primijeniti na zgrade koje imaju status kulturnog dobra. Ipak, pažljivim planiranjem, primjenom naprednih tehnologija i izborom prihvatljivih rješenja, moguće je poboljšati energetske učinkovitost zgrada kulturnog značaja, pod uvjetom da odabrane mjere ne narušavaju vrijednosti i karakteristike zgrade zbog kojih je proglašen status kulturnog dobra.

Prijedlog mjera energetske obnove zgrade izrađuje ovlaštenu projektanta koji posjeduje dozvolu Ministarstva kulture za rad na kulturnim dobrima [24]. Ovaj prijedlog temelji se na energetskom pregledu i utvrđenim spomeničkim svojstvima zgrade. Ako postoje podaci o ranije izvedenim radovima ili istraživanjima na zgradi, trebaju biti integrirani u prijedlog energetske obnove. Nakon izrade prijedloga, potrebno je zatražiti stručno mišljenje od nadležnog konzervatorskog odjela. Konzervatorski odjel analizira utvrđene vrijednosti kulturnog dobra i njegovih dijelova kako bi izradio stručnu ocjenu prijedloga energetske obnove.

Za pravilnu procjenu mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti zgrade, ključno je znati njezinu buduću namjenu, jer ona značajno utječe na sve daljnje aktivnosti i odluke vezane uz zgradu. Također, pretpostavke za energetske obnovu uključuju osiguranje konstruktivne stabilnosti zgrade, zaštitu od kapilarne vlage i oborinskih voda te uklanjanje neprimjerenih zahvata na zgradi.

Projektiranje energetske obnove zgrade izuzetno je složen proces koji zahtijeva interdisciplinarni pristup od pripreme faze do izvedbe. U sklopu projekta potrebno je uskladiti uvjete za buduće korištenje zgrade s ciljem poboljšanja energetske svojstava te zaštite vrijednosti i obilježja kulturnog dobra. Svi predviđeni zahvati ne smiju negativno utjecati na svojstva kulturnog dobra, njegovu cjelovitost i namjenu, kako tijekom izvođenja radova, tako i u kasnijem korištenju zgrade. Stoga, treba predvidjeti minimalne, neinvazivne i, ako je moguće, reverzibilne zahvate koji će dugoročno očuvati autentičnost i vrijednosti zgrade.

Svaki model energetske obnove mora uključivati tehničke sustave koji, uz poboljšanje toplinskih karakteristika ovojnice zgrade, doprinose ukupnom energetskom stanju zgrade. Ako predložene mjere za ovojnici zgrade, usklađene s konzervatorskim smjernicama, ne

osiguravaju dovoljnu uštedu energije, preporučuje se da se dodatna ušteda postigne unaprjeđenjem tehničkih sustava zgrade. [2]

2.5.1. Mjere energetske obnove kulturne baštine

Mjere energetske obnove podrazumijevaju [2]:

- povećanje toplinske zaštite ovojnice zgrade, koje obvezno uključuje građevinsku obnovu (sanaciju), kojom se uspostavljaju toplinska svojstva zgrade iz vremena izgradnje uz potrebna poboljšanja kroz primjenjive mjere energetske učinkovitosti,
- povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, klimatizacije i pripreme potrošne vode,
- povećanje učinkovitosti sustava rasvjete,
- korištenje obnovljivih izvora energije i alternativnih sustava njihovog korištenja,
- uvođenje sustava automatizacije i upravljanja zgradom ili njezinim dijelom.

Izuzetno je važno da se projektom predvidi upotreba kompatibilnih, ne nužno konvencionalnih materijala, koji neće narušiti autentičnost i izvornost zgrade, a koji će dugoročno osigurati očuvanje njezinog fizičkog stanja. Materijali predviđeni mjerama trebaju biti paropropusni kako bi omogućili „disanje“ izvornih građevinskih struktura i materijala.

Općenito, primjena mjera za poboljšanje toplinske zaštite može imati najveći utjecaj na svojstva kulturnog dobra. Zbog toga je ključno izraditi precizne posebne uvjete za sve dijelove zgrade na koje se te mjere mogu primijeniti [2]

- vanjski zidovi
- zidovi prema negrijanom prostoru
- vanjski zidovi prema tlu
- zidovi između grijanih prostora različitih korisnika
- podovi na tlu
- stropovi iznad negrijanog prostora (podruma, veža i sl.)
- stropovi ispod negrijanog prostora (tavana)
- kosi krovovi iznad grijanog prostora
- ravni krovovi iznad grijanog prostora
- stropovi iznad vanjskog prostora

- međukatna konstrukcija koja odvaja prostore različitih korisnika
- prozori, staklene stijene i vanjska vrata.

U nastavku su opisane smjernice prema kojima valja projektirati spomenute dijelove zgrade, a sve u skladu s *Preporukama za primjenu mjera energetske učinkovitosti na graditeljskoj baštini*, [2].

2.5.1.1. Zidovi

Vanjski zidovi, odnosno pročelja zgrada, ključni su elementi arhitektonskog oblikovanja i predstavljaju bitno obilježje kulturnih dobara jer su odraz graditeljskih i estetskih standarda vremena u kojem su nastali. Kod pojedinih zgrada, materijal korišten za izvedbu pročelja je sam po sebi oblikovni element. U tim slučajevima, bez obzira radi li se o tradicionalnim ili suvremenim materijalima, nije moguće intervenirati izvana na način koji bi radikalno promijenio izgled zgrade radi poboljšanja toplinske zaštite.

Geometrija pročelja, odnos ravnine pročelja i otvora, upuštenost otvora ili njihova izvedba u ravnini pročelja, odnos pročelja i krova te oblikovanje krova, predstavljaju elemente koji pridonose jedinstvenom i karakterističnom izgledu zgrade te ih je nužno očuvati zbog utvrđene kulturne vrijednosti. Ako je zbog konzervatorskih smjernica neprihvatljivo povećavati toplinsku zaštitu oblaganjem vanjske strane zidova, preporučuje se sanacija zidova s poboljšanim pristupom vraćanja u izvorno stanje, uz eventualnu primjenu metode temperiranja zidova. Također, moguće je primijeniti najsuvremenije metode i izolacijske materijale koji ne narušavaju utvrđena svojstva zgrade.

Na jednostavnijim dvorišnim pročeljima zaštićenih zgrada te na zgradama koje nisu pojedinačno zaštićene, a gdje promjena volumena fasade ne utječe bitno na njihov izgled niti narušava izgled zaštićene kulturno-povijesne cjeline, povećanje toplinske izolacije predstavlja prihvatljivu mjeru energetske učinkovitosti.

2.5.1.2. Krovovi

Krovne konstrukcije jedan su od bitnijih dijelova zgrade i važan su pokazatelj tehnologije građenja i obrtničkih dosega. S konzervatorskog stajališta, izuzetno je važno očuvati krovne konstrukcije u njihovim izvornim oblicima. Istovremeno, krovne konstrukcije pružaju određene mogućnosti za povećanje toplinske zaštite. Pri planiranju intervencija, ključno je sačuvati izgled krovišta, geometriju, te karakteristične detalje izvedbe kako izvana tako i iznutra.

2.5.1.3. Međukatne konstrukcije (stropovi, podovi)

Bitan su element zgrada i međukatne konstrukcije. Povećanje toplinske zaštite iznad ili ispod međukatnih konstrukcija zaštićenih zgrada je prihvatljivo rješenje, pod uvjetom da ne utječe na vrijedne elemente interijera, poput vidljivih dijelova konstrukcije, opločenja, obloga, oslikanih površina, štukatura i slično. Također, povećanje toplinske zaštite podnih konstrukcija koje su u izravnom dodiru s tlom je uglavnom prihvatljivo, ako zahvati ne narušavaju vrijedne elemente zgrade koji se mogu ukloniti i potom vratiti na isto mjesto. Kod energetske obnove zgrade često je potrebno riješiti i zaštitu od vlage u dodiru s tlom, što obično zahtijeva uklanjanje svih postojećih slojeva poda.

2.5.1.4. Vanjska stolarija

Vanjska stolarija sastavni je dio oblikovanja pročelja i bitno određuje karakter i svojstva kulturnog dobra, stoga je potrebno raditi na njezinu očuvanju i obnovi kad je to moguće, s obzirom na zatečeno stanje stolarije. Vanjsku stolariju potrebno je redovito održavati popravcima i zamjenama dotrajalih dijelova. Povećanje energetske učinkovitosti vrijedne stolarije treba provoditi pažljivim zahvatima koji neće značajno mijenjati njezin izgled i integritet zgrade, kao što su popravci, brtvljenje, intervencije na staklu ili dopuna novim dijelovima.

Na primjer, kod dvostruke stolarije moguće je poboljšati energetske karakteristike unutarnjih dijelova ugradnjom izo-stakla i sličnim minimalnim intervencijama. Kod jednostruke stolarije može se razmotriti ugradnja dodatnih elemenata s unutarnje strane otvora, oblikovno usklađenih s postojećom stolarijom i interijerom (krila, vjetrobrani i sl.), uz obveznu obnovu vanjske stolarije u izvornom obliku.

Kod zgrada niže vrijednosti, iako jednostavnija, vanjska stolarija treba biti obnovljena, dopunjena ili ponovljena u skladu sa zatečenim stanjem. Ako je zamjena vanjske stolarije neophodna, potrebno je uskladiti njezin dizajn s cjelokupnim izgledom zgrade i tehničkim zahtjevima energetske učinkovitosti.

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

Tehnički sustavi se također prilagođavaju specifičnim uvjetima zgrade i njezinim karakteristikama. Preporučuje se korištenje obnovljivih izvora energije, pod uvjetom da se njihovom primjenom ne narušavaju karakteristična svojstva kulturnog dobra, utvrđena stručnim vrednovanjem i rješenjem Ministarstva kulture. Odabir obnovljivog izvora energije

i alternativnih sustava treba se temeljiti na stručnoj analizi energetske svojstva zaštićenog objekta i mogućnosti mikro-lokacije na kojoj se nalazi. Također, alternativni sustavi trebali bi biti reverzibilni, odnosno lako zamjenjivi.

Obnovljivi izvori energije potječu iz prirodnih, obnovljivih resursa poput sunčeve energije (izravne i neizravne), vjetra, hidroenergije, biomase, valova, morskih struja, te toplinske energije mora, geotermalne energije i toplinskog kapaciteta zemlje, kao i plime i oseke (gravitacijske sile).

Alternativni sustavi korištenja energije jesu svi oni koji ne primjenjuju izravan transfer energije, na primjer:

- kogeneracija,
- trigeneracija,
- daljinsko grijanje i hlađenje,
- svi oblici dizalica topline (zrak, voda, zemlja u kombinacijama),
- grijanje i hlađenje ugrađeno u građevinske mase,
- temperiranja građevinskih masa (predgrijavanja),
- korištenje alternativnih izvora kondicioniranog zraka (špilje, supstrukcije građevina i sl.),
- drugi sustavi koji mogu nastati tehnološkim razvojem.

Ugradnja solarnih panela na zaštićena kulturna dobra dopuštena je samo u iznimnim slučajevima, uz stroga ograničenja. Solarni sustavi na krovovima mogu biti prihvatljivi ako su prilagođeni veličinom, nisu vidljivi iz javnih prostora (otvorenih i zatvorenih) te ne narušavaju estetske vrijednosti kulturnog dobra. Takvi sustavi moraju biti arhitektonski integrirani u krov i usklađeni s vrstom pokrivača.

Postavljanje solarnih panela nije dopušteno u kulturno-povijesnim cjelinama na krovovima koji su dio povijesnog krovnog pejzaža. Isti su bitan faktor u vizualnom doživljaju naselja i uočljive su npr. u panoramskom pogledu na grad.

Dizalice topline, koje crpe toplinu iz vode, zemlje ili zraka, funkcioniraju po principu sličnom rashladnim uređajima. Dizalice topline koje koriste zrak najjednostavnije su za ugradnju, najpovoljnije i ne zahtijevaju podzemne sustave poput kolektora ili dubinskih sondi.

Toplina podzemnih voda može se koristiti kao izvor topline, a također i toplina površinskih voda poput jezera, rijeka, mora ili otpadne industrijske vode. Pumpe crpe vodu iz kolektora smještenih na dubini gdje je temperatura vode stalna.

Ugradnja dizalica topline može utjecati na spomenička svojstva povijesne građevine na dva načina: zadiranjem u povijesnu strukturu zgrade i utjecajem na okolinu, uključujući širi krajolik. Prije početka radova na iskopu za kolektore ili dubinske sonde potrebno je procijeniti arheološki potencijal lokacije. Ako se radi o poznatom ili pretpostavljenom arheološkom nalazištu, treba osigurati zaštitna arheološka istraživanja ili kontinuirani arheološki nadzor tijekom radova.

3. METODOLOGIJA RADA

U prethodnom poglavlju *Teorijska podloga* predstavljena je važnost energije za rast i razvoj, pojam energetske učinkovitosti, energetske certificiranje, osnovni principi nZEB projektiranja te izazovi energetske obnove kulturne baštine.

Tema diplomskog rada je istražiti mogućnost energetske obnove zgrade u kulturno-povijesnoj cjelini grada. Na primjeru energetske obnove Zavičajnog muzeja Biograd na Moru odgovorena su najčešća pitanja prilikom obnove:

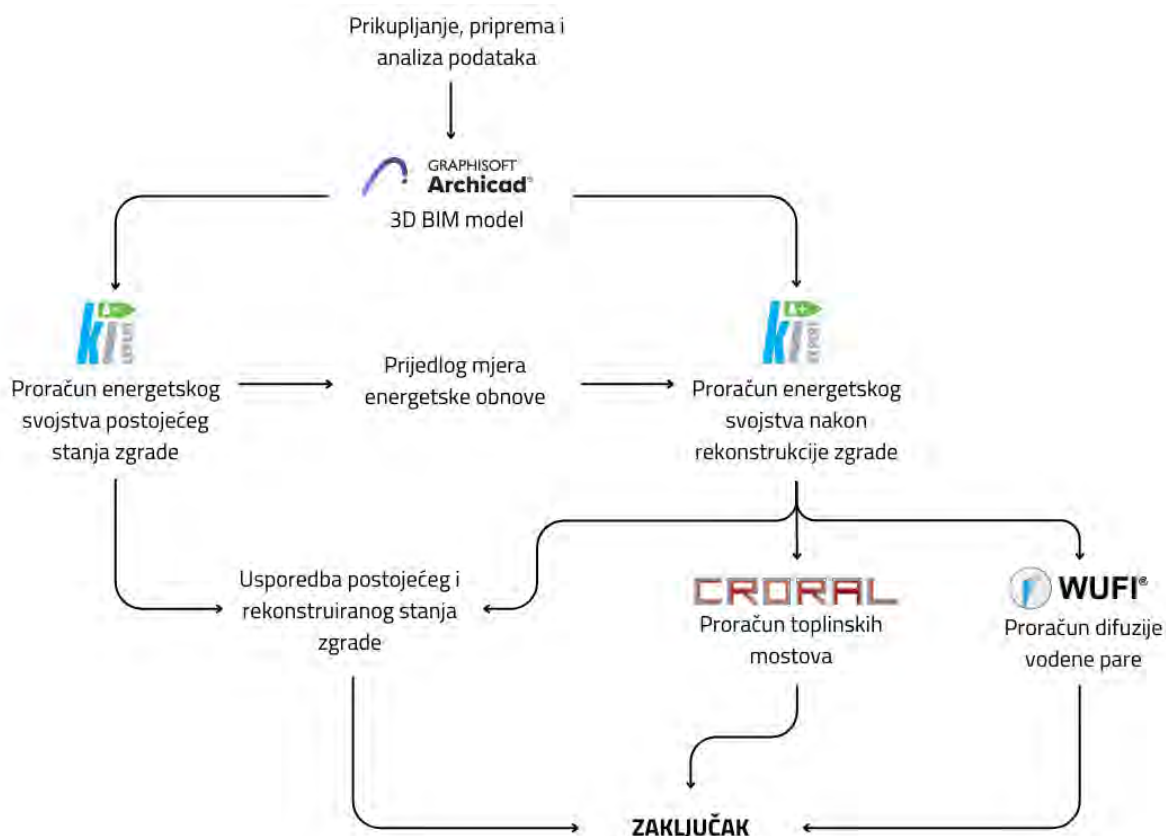
1. Koliko konzervatorska ograničenja zbilja ograničavaju kada je u pitanju zgrada koja nije pojedinačno kulturno dobro?
2. Kako se uskladiti sa zakonskim okvirima i konzervatorskim smjericama?
3. Koje su mogućnosti za poboljšanje energetske efikasnosti bez ugrožavanja estetske vrijednosti?
4. Kako će radovi utjecati na dugoročnu održivost i vrijednost zgrade?

U nastavku će se objasniti istraživački pristup, podaci te korištene metode kojima se nastojalo odgovoriti na istraživačka pitanja te ostvariti opće i pojedinačne ciljeve ovoga diplomskog rada.

U prvoj fazi istraživanja su se prikupljali i pripremali bitni podaci. Kvalitetni ulazni podaci preduvjet su izradi točnog, vjerodostojnog modela koji treba biti dobra aproksimacija stvarne situacije. Na raspolaganju je bio Glavni arhitektonski projekt rekonstrukcije muzeja, tvrtke „AB Forum d.o.o.“ te fotografije postojećeg stanja muzeja. Skromni podaci o postojećem stanju nadopunjeni su spoznajama iz pouzdane literature, a koje vrijede za zgrade iz sličnog razdoblja izgradnje.

Nakon pripreme i analize podataka, na temelju istih, izrađen je 3D BIM model u programskom paketu „Archicad 27“ koji je poslužio za proračun geometrijskih karakteristika potrebnih za proračun fizike zgrade. Geometrijske karakteristike te klimatski podaci pripadajuće lokacije su ulazni parametri za „KI Expert Plus“ u kojem je proveden proračun fizike zgrade. Rezultat proračuna je energetska iskaznica za postojeće stanje Zavičajnog muzeja. Potom su predložene mjere energetske obnove u skladu s konzervatorskim preporukama te je proračunata fizika rekonstruirane, energetske obnovljene zgrade. Sve poduzete mjere su detaljno opisane u poglavlju *Mjere energetske obnove*. Energetska iskaznica postojećeg i rekonstruiranog stanja su uspoređene te su istaknuti konačni rezultati. Nakon proračuna u KI Expert Plus-u uslijedio je proračun toplinskih mostova na

potencijalnim mjestima povećanog toplinskog toka, a proveden je u CRORAL-u. Ispitana je i difuzija vodene pare kako bi se provjerio rizik pojave kondenzacije, a ispitivanje je provedeno u programskom paketu „WUFI® Light 6.3.2“

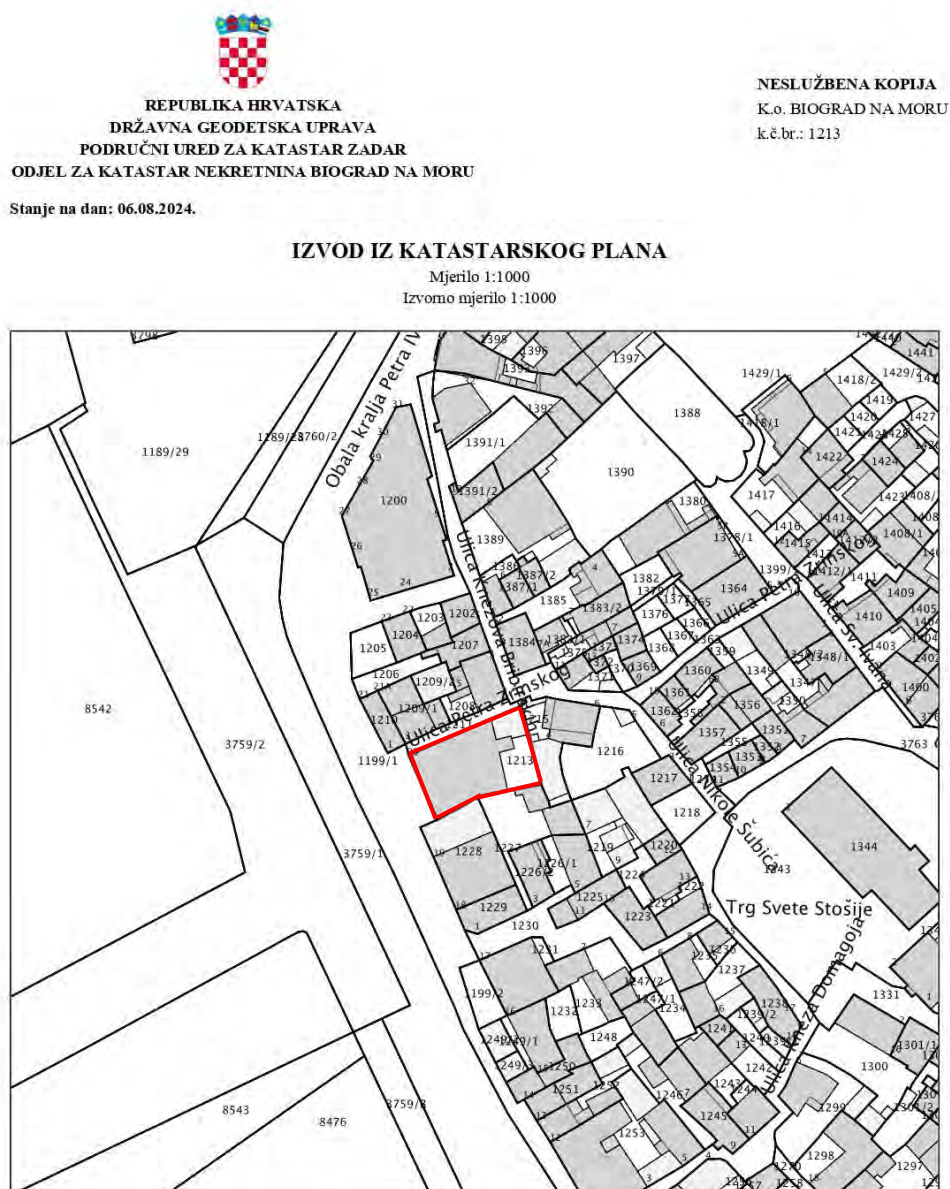


Slika 5. Shematski prikaz provedenog istraživanja

4. ZGRADA ZAVIČAJNOG MUZEJA BIOGRAD NA MORU

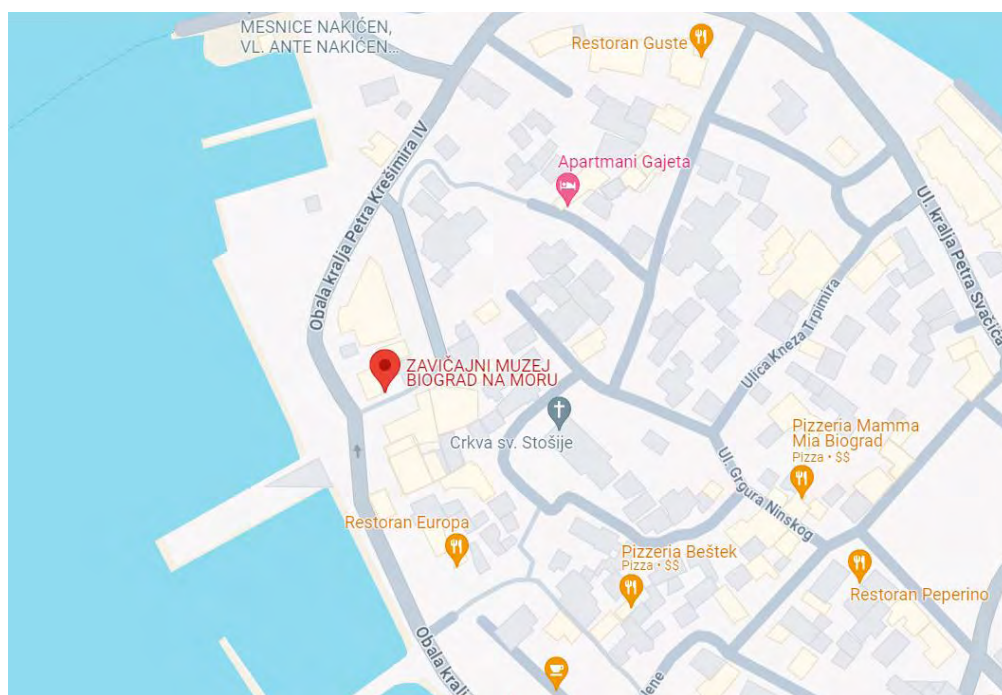
4.1. Lokacijski uvjeti

Ovim diplomskim radom predlaže se energetska obnova zgrade na lokaciji Obala Petra Krešimira IV 20, Biograd n/M, na građevnoj čestici k.č.br. 1213 k.o. Biograd na Moru (Slika 6).



Slika 6. Izvod iz katastarskog plana [25]

Građevinska čestica k.č.br. 1213 k.o. Biograd na Moru površine je 315 m². Gabariti zgrade iznose 23,71 x 14,90 m. Parcela je položena u smjeru sjeveroistok – jugozapad. S jugozapadne strane moguć je kolni i pješački pristup zgradi u obliku proširenja popločanog javnog puta, a sa sjeverozapadne strane samo pješački pristup. Unutar obuhvata nisu predviđene parkirališne površine.



Slika 7. Lokacija zgrade [26]

Biograd se navodi još u X. stoljeću kao sjelo hrvatskih vladara, te se od tada razvija kao urbana cjelina. U 19. st. postaje jedan od važnijih gradova tadašnje ranofeudalne Hrvatske. Mletačkim razaranjem ostaje tek manja „varoš“ koja je za turskih provala utvrđena u središte kapetanije. Kuće na poluotoku su većinom ruralnog karaktera, katnice i dvokatnice kamenih i žbukanih pročelja, dok one na obali imaju nešto urbanije osobine. Početkom 20. st. u predjelu Varoš nastaju kuće urbanog karaktera sa žbukanim profilacijama historicističkih stilova.

Zgrada se nalazi unutar urbane kulturno-povijesne cjeline grada, te je upisana u Registar kulturnih dobara RH pod brojem Z-4244. Intervencije unutar zaštićene povijesne jezgre dopuštene su samo uz prethodno odobrenje nadležnog konzervatorskog tijela.

Građevina se nalazi na tri čestice od kojih se dvije manje sa sjeverne strane nalaze u zoni „M1j“ koja označava područje zaštićene povijesne jezgre (prema Prostornom planu uređenja grada Biograda n/M). Unutar zone „M1j“ dopušta se gradnja novih te rekonstrukcija

postojećih građevina prema konzervatorskim uvjetima nadležnog tijela. Sve uvjete za gradnju (izgrađenost, iskoristivost, visinu, katnost, udaljenost od regulacijskog pravca, nagib krova, udaljenost od susjedne čestice i sl.) propisuje nadležno tijelo. Treća, najveća čestica (k.č. br. 1213), zajedno s postojećom zgradom Muzeja, nalazi se u zoni „D6“ čija je namjena kulturna (prema Prostornom planu uređenja grada Biograda n/M), te za nju također vrijedi kako sve uvjete za gradnju izdaje nadležno konzervatorsko tijelo.

Ministarstvo kulture i medija

Web Registar kulturnih dobara RH

Opći podatci

Naziv dobra:	Kulturno-povijesna cjelina grada Biograda na moru
<i>Naziv dobra (eng):</i>	
Lista i registarski broj:	Kulturnopovijesna cjelina, Z-4244
Pravni status:	Zaštićeno kulturno dobro
Vrsta:	Kulturnopovijesna cjelina
Klasifikacija:	urbana cjelina
Datacija:	8 st. p.n.e. - 20 st. n.e.
Autor:	
UNESCO:	

Smještaj kulturnog dobra

Županija:	Zadarska županija
Grad/općina:	BIOGRAD NA MORU
Adresa:	Biograd na Moru

Slika 8. Izvadak iz Registra kulturnih dobara [27]

Zgrada nema status pojedinačnog kulturnog dobra, već je dijelom kulturno-povijesne cjeline grada koja datira od 8. st.p.n.e. do 20. st.n.e. Status kulturnog dobra u svakom slučaju utječe na dopušteni stupanj intervencije kada je riječ kako o konstruktivnoj, tako i o energetskej obnovi. Kao što je ranije naglašeno, svi zahvati koji se izvode na građevini moraju biti u skladu s preporukama konzervatora i Ministarstva kulture.

Zavičajni muzej Biograda na Moru se nalazi na samoj obali poluotoka te uvelike doprinosi vizurama i identitetu grada Biograda (Slika 9). U skladu s tim, energetska obnova predmetnog muzeja mora biti takva da vizure i identitet grada nakon obnove budu očuvani. Važno je poštovati sva pravila građevinsko-arhitektonske, ali i konzervatorske struke, te interdisciplinarnim pristupom pronaći optimum između očuvanja izvornog izgleda i zahtjeva koje nameće 21. stoljeće.

Nakon rekonstrukcije, namjena zgrade ostaje društvena, ali umjesto Zavičajnog muzeja Biograda na Moru, postaje Interpretacijski centar potopljene baštine.



Slika 9. Jezgra Biograda na Moru [27]

Minimalni uvjet za obnovu postojeće javne turističke infrastrukture zahtijeva postizanje standarda s minimalno 30% uštede energije (kWh/god) i/ili 30% stakleničkih plinova (CO₂t/god) u odnosu na ex ante.

4.2. Postojeće stanje građevine

Predmetna zgrada je nestambena zgrada izgrađena u 19. stoljeću za potrebe Kotarskog suda. Nakon II. svjetskog rata, koristili su ju Mjesna zajednica, Pučko učilište i knjižnica. 1977. godine postaje muzejsko vlasništvo i prostor za muzejsku djelatnost. 2022. godine postaje vlasništvo Grada Biograda na Moru.

Tijekom svog životnog vijeka, zgrada je nadograđivana, te su na istoj rađeni manji zahvati. Većinu građevnih dijelova nije bilo moguće u potpunosti definirati samo na temelju tlocrta i fotografija, a kako bez provođenja razornih metode ispitivanja na zgradi nije moguće utvrditi točno stanje, sve potrebne informacije za proračun fizike zgrade pronađene su u knjizi „Konstruktivni elementi“ autora Đure Peulića [29], u kojoj su shematski prikazani tipični načini izvođenja konstruktivnih elemenata za pojedina razdoblja u povijesti gradnje. Zbog manjkavosti raspoložive dokumentacije koja bi pružila uvid u spomenute zahvate, analiza u nastavku prikazuje aproksimaciju postojećeg stanja.



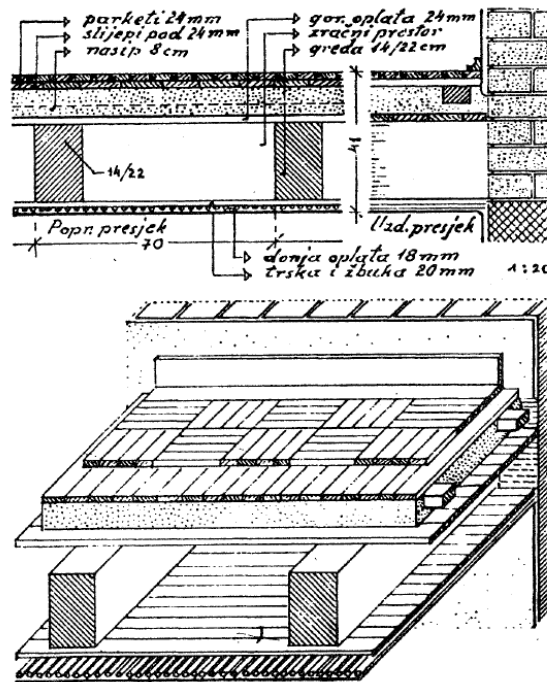
Slika 10. Zavičajni muzej Biograd na Moru [28]

Maksimalna tlocrtna površina građevine iznosi 307 m², a maksimalna visina objekta od najniže kote obrađenog terena uz sam objekt do gornjeg ruba i krovnog vijenca iznosi 9,08 m. U prizemlju je hodnik kojim je prostor podijeljen na dva dijela. S jedne strane tri prostorije međusobno povezane formiraju jednu cjelinu, a s druge strane su dvije izložbene prostorije između kojih je smještena glavna vertikalna komunikacija – dvokrako stubište. Na kraju ulaznog hodnika smješteno je otvoreno dvorište – lapidarij. Prvi kat je tlocrtno otvorenijeg plana u odnosu na prvi. Na drugom katu su izložbene prostorije i muzejska administracija dok je u potkrovlju arhiva, odnosno skladište muzejske građe. Građevina ima dvostrešno drveno krovište. Nije hidroizolirana i ima veliki problem s vlagom.

Konstruktivni zidovi su kameni zidovi debljine 55-67 cm, dok su dograđeni zidovi od opeke debljine 25-30 cm. Sustav nosivih zidova čine vanjski zidovi u kombinaciji s dva poprečna zida unutar građevine koji dijele tlocrt na tri podjednaka dijela. Vanjski zidovi su obostrano ožbukani te je kao završni sloj nanescena fasadna boja.

Iznad svih etaža izvedena je stropna konstrukcija od drvenih grednika s gornje i donje strane obložena daščanom oplatom. Na gornju oplatu nastavlja se sloj pijeska ili šute, slijepi pod i završna podna obloga. Na donju oplatu postavlja se sloj trstike i žbuke (Slika 11). Obloga poda u prizemlju je od kamenih ploča, dok je na katu tapecirana daščana oplata.

Hidroizolacija nije riješena u slojevima poda na tlu niti u slojevima krova.



Slika 11. Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [29]

Na vanjskim otvorima ugrađena je drvena stolarija sa škurama. Škure su uglavnom zatvorene, izuzev otvora na jugozapadnom pročelju. Na unutarnjim otvorima ugrađena je također drvena stolarija. Prozori su jednostruki i „krilo na krilo“ s jednoslojnim bezbojnim staklom. Vidljivo je kako su svi prozori i vrata na pročelju dotrajali. Obzirom na razdoblje izgradnje predmetne zgrade, postavljena stolarija ne može biti u skladu s današnjim standardima, što će reći da otvori predstavljaju slabu točku zgrade i doprinose zrakopropusnosti.

4.2.1. Geometrijske karakteristike zgrade

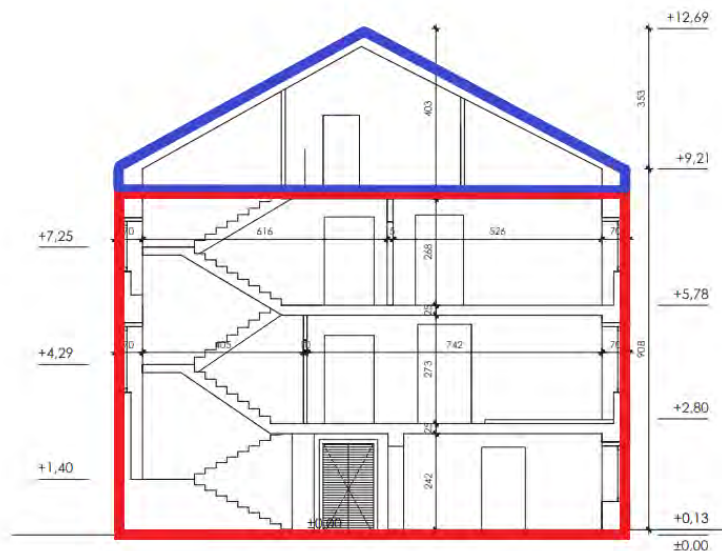
Prema Tehničkom propisu [8] predviđeno je da se proračun energetskih svojstava dijela zgrade u pogledu racionalne uporabe energije te toplinske zaštite mora izraditi za dio zgrade kao za samostalnu zgradu, odnosno kao zasebnu toplinsku zonu, ukoliko se taj dio od preostalog dijela zgrade razlikuje:

1. prema namjeni,
2. prema unutarnjoj projektnoj temperaturi za više od 4 °C,
3. prema unutarnjoj projektnoj temperaturi ($\theta_{\text{int,set,H}} \geq 18 \text{ °C}$ ili $12 \text{ °C} < \theta_{\text{int,set,H}} < 18 \text{ °C}$),
4. po vrsti i režimu korištenja termotehničkih sustava.

Također, ako se proračun energetske svojstva dijelova zgrade radi odvojeno i kada je razlika temperature grijanja manja ili jednaka $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, smatra se da kroz razdjelne plohe između tih dijelova zgrade ne prolazi toplina i njihova ploština se ne uzima u obzir kod izračunavanja oplošja grijanog dijela zgrade [30].

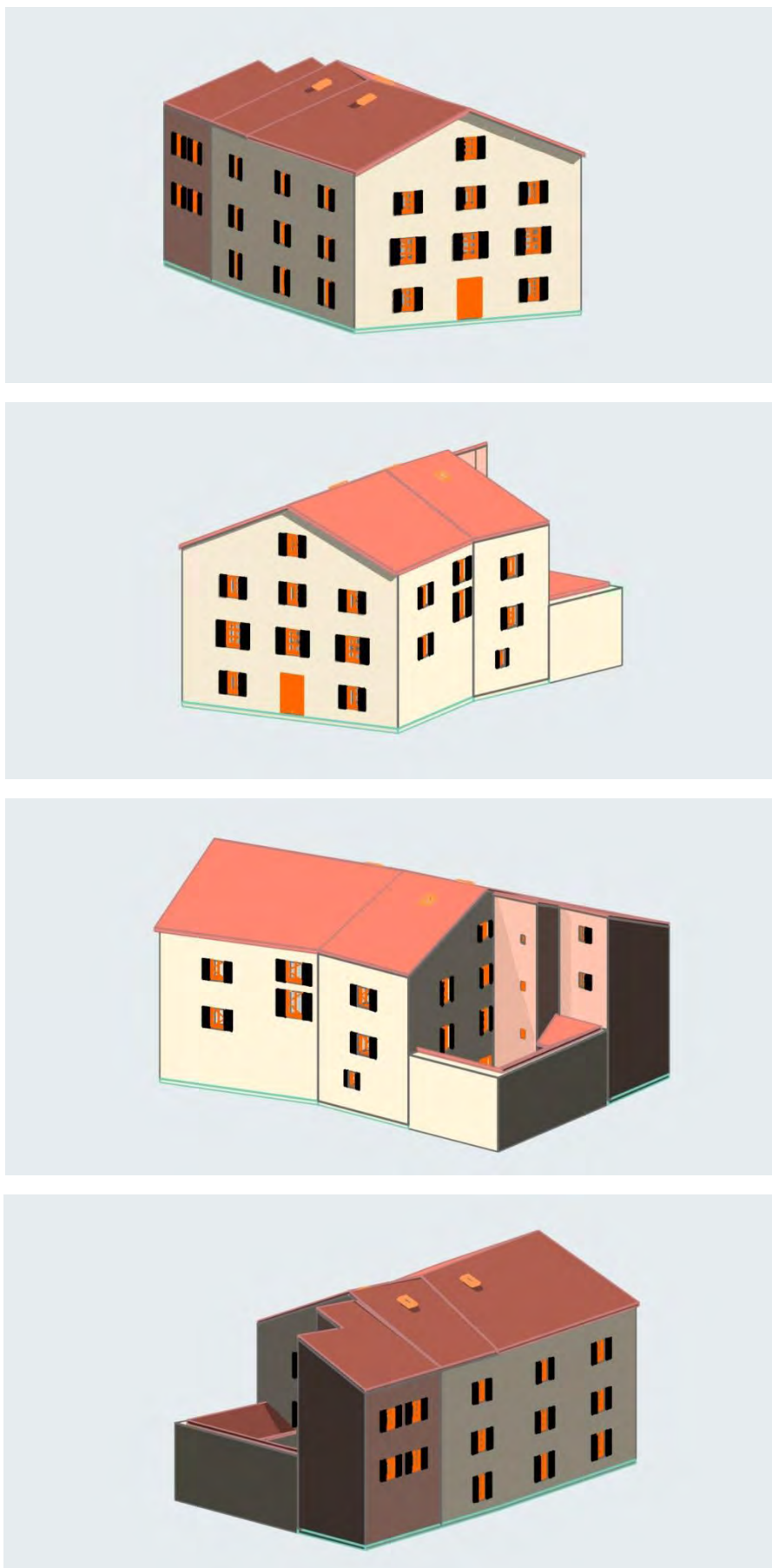
Prizemlje, prvi i drugi kat su grijani, dok je negrijan tavanski prostor predviđen za skladište u potkrovlju. Sve prostorije unutar grijanog dijela zgrade imaju jednaku namjenu, jednaku projektiranu temperaturu te se koriste istim termotehničkim sustavom.

Zgrada Zavičajnog muzeja Biograd na Moru definirana je kao jedna grijana zona prilikom proračuna energetske svojstva zgrade. Jedna zona zgrade proračunata je s podjelom na grijani i negrijani prostor. Grijani prostor označen je crvenom, dok je negrijani prostor označen plavom bojom (Slika 12).



Slika 12. Zona podijeljena na grijani prostor (crveno) i negrijani prostor (plavo)

Za potrebe proračuna energetske svojstva predmetne zgrade, zgrada je modelirana u programskom paketu „Archicad 27“ na temelju raspoloživih podloga i fotografija. Po izradi BIM modela zgrade, očitane su geometrijske karakteristike zgrade nužne za provođenje proračuna građevinske fizike (priložene u nastavku).



Slika 13. Aksonometrijski prikaz modela Zavičajnog muzeja Biograd na Moru (Archicad)

Tablica 6. Geometrijske karakteristike zgrade (prema 3D modelu)

Geometrijske karakteristike	Zona 1
Oplošje grijanog dijela zgrade A [m ²]	1152,24
Obujam grijanog dijela zgrade V _e [m ³]	2272,22
Obujam grijanog zraka V [m ³]	1529,86
Ploština korisne površine grijanog dijela zgrade A _k [m ²]	573,91
Ukupna ploština pročelja A _{uk} [m ²]	1008,77
Ukupna ploština prozora A _{wuk} [m ²]	41,83
Broj etaža	4
Površina kondicionirane zone računate s vanjskim dimenzijama A _f [m ²]	760,80
Faktor oblika zgrade f ₀ [m ⁻¹]	0,51
Bruto površina zgrade [m ²]	990,00
Unutarnja projektirana temperatura u sezoni grijanja $\theta_{int,set,H}$ [°C]	20
Unutarnja projektirana temperatura u sezoni hlađenja $\theta_{int,set,C}$ [°C]	22

4.2.2. Klimatski podaci

Temperatura zraka, relativna vlažnost, brzina vjetra te izloženost Sunčevu zračenju uvelike utječu na toplinske dobitke i gubitke, proračun toplinskih mostova i difuziju vodene pare. Klimatske parametre određujemo s obzirom na referentnu meteorološku postaju. Za proračun fizike Zavičajnog muzeja Biograd na Moru, odabrana je meteorološka postaja Zadar (5 m n.v.). Nalazi se u 4. zoni globalnog Sunčevog zračenja sa srednjom mjesečnom temperaturom vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade $\theta_{e,mj,min} > 3^{\circ}\text{C}$ i unutarnjom temperaturom $\theta_i \geq 18^{\circ}\text{C}$.

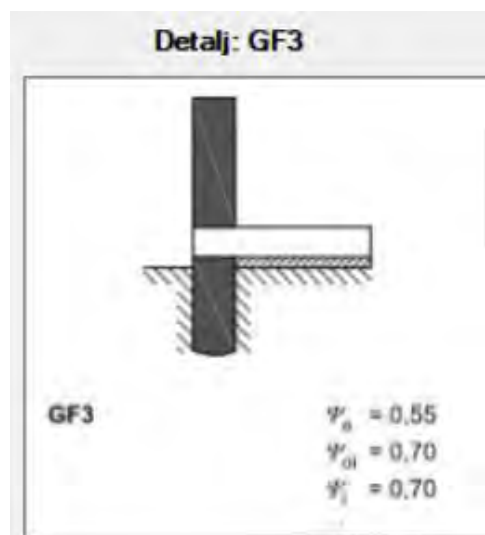
Tablica 7. Klimatski podaci za referentnu meteorološku postaju

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Temperature zraka (°C)													
m	7,5	7,5	10,1	13,5	18,4	22,3	24,8	24,5	20,1	16,4	12,2	8,6	15,5
min	-1,6	-2,3	-2,2	3,8	8,8	14,8	17,7	16,7	13,1	5,7	1,4	-4,6	-4,6
max	14,8	13,4	16,5	19,7	25,1	28,6	30,7	29,8	26,1	22,8	20	16	30,7
Tlak vodene pare (Pa)													
m	750	770	880	1110	1480	1810	1970	1980	1730	1360	1050	820	1310
Relativna vlažnost zraka (%)													
m	71	69	71	73	71	70	66	69	70	73	74	71	71
Brzina vjetra (m/s)													
m	2,4	2,6	2,5	2,4	2,1	2	2	1,8	1,8	2	2,7	2,6	2,2

4.2.3. Toplinski dobici i gubici

Toplinski gubici uglavnom se ostvaruju preko vanjske ovojnice zgrade, no bitno je spomenuti gubitke ostvarene preko toplinskih mostova te gubitke kroz otvore zgrade. Kod proračuna toplinskih mostova, koristi se korekcijski faktor prolaska topline pomoću paušalnih dodataka za svaki građevni dio koji čini vanjsku ovojnicu. Za stariju neizoliranu zgradu bez riješenih toplinskih mostova, uzima se paušalni dodatak na koeficijent prolaska topline od $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Ukoliko se uzmu u obzir paušalni dodaci za svaki građevni dio, tada Tehničkim propisom nije predviđen daljnji proračun toplinskih mostova, odnosno isti nije potrebno izvršiti. Metoda korekcije koeficijenata prolaska topline ima manju točnost nego detaljni proračun pojedinih toplinskih mostova, međutim često se koristi zbog praktičnosti.

Za spoj neizoliranog zida i poda na tlu, odabran je detalj GF 3, čiji duljinski koeficijent toplinskih gubitaka iznosi $0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.



Slika 14. Detalj odabranog toplinskog mosta

Toplinski gubici odvijaju se i prema negrijanim prostorima. Kondicionirana zona graniči s negrijanim tavanskim prostorom.

Ukupni toplinski dobici uključuju unutarnje i solarne toplinske dobitke. Unutarnji toplinski dobici izračunati su prema normi HRN EN 13790. Solarni dobici uzeti su u obzir za sve otvore na vanjskoj ovojnici zgrade sa staklenim površinama, osim otvora koji su 90% vremena zamračeni škurama. Solarnih dobitaka preko staklenika za predmetnu zgradu nema.

4.2.4. Podaci o termotehničkom sustavu i rasvjeti

Prema Tehničkom propisu, termotehnički sustav je tehnička oprema za grijanje, hlađenje, ventilaciju, klimatizaciju i pripremu potrošne tople vode zgrade ili samostalne uporabne cjeline zgrade. O namjeni zgrade ovisi koja će se tehnička oprema uzimati u obzir kod definiranja termotehničkog sustava, što je detaljnije opisano u poglavlju o zahtjevima za postizanje nZEB standarda. S obzirom da je riječ o muzeju, prilikom proračuna u obzir se uzimaju sustavi za grijanje i hlađenje, mehanička ventilacija (ako postoji), ali ne i sustav pripreme PTV-a.

Postojeći sustav grijanja u zgradi je centralno grijanje na električnu energiju. Za potrebe hlađenja, koriste se klima uređaji. Pretpostavka je da se u predmetnoj zgradi koriste klima uređaji s početka prošlog desetljeća, te je očekivana manja učinkovitost navedenih uređaja u usporedbi sa suvremenima. Mehanička ventilacija ne postoji.

Kod proračuna konačne energije, potrebno je uzeti u obzir i korišteni sustav rasvjete. Rad sustava rasvjete u predmetnoj zgradi regulira se lokalno preko zidnih sklopki. Nazivna snaga rasvjete i potrošnja električne energije koja nastaje zbog rada sustava rasvjete dana je *Algoritmom za određivanje energetske potrebe i učinkovitosti sustava rasvjete u zgradama*. Za potrebe proračuna uzeta je specifična nazivna snaga rasvjete $15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. [31]

4.2.5. Karakteristike otvora

Sva stolarija na zgradi je drvena, uključujući vanjsku i unutarnju stolariju. Prozori su jednostruki, stakla su debljine 4 m, a okviri prozora 5 cm, bez brtvljenja što povećava infiltraciju vanjskog zraka. Gotovo svi prozori na zgradi imaju zasjenjenje s vanjske strane u obliku škura, osim malih prozora na jugoistočnoj strani koji se nalaze na nadograđenom dijelu muzeja (Slika 15). Sva vrata na zgradi su neprozirna.

Obzirom da točna vrijednost koeficijenta prolaska topline nije poznata, račun je proveden s vrijednostima preuzetim iz Priručnika za energetske certifikacije zgrada [32], (Tablica 8).

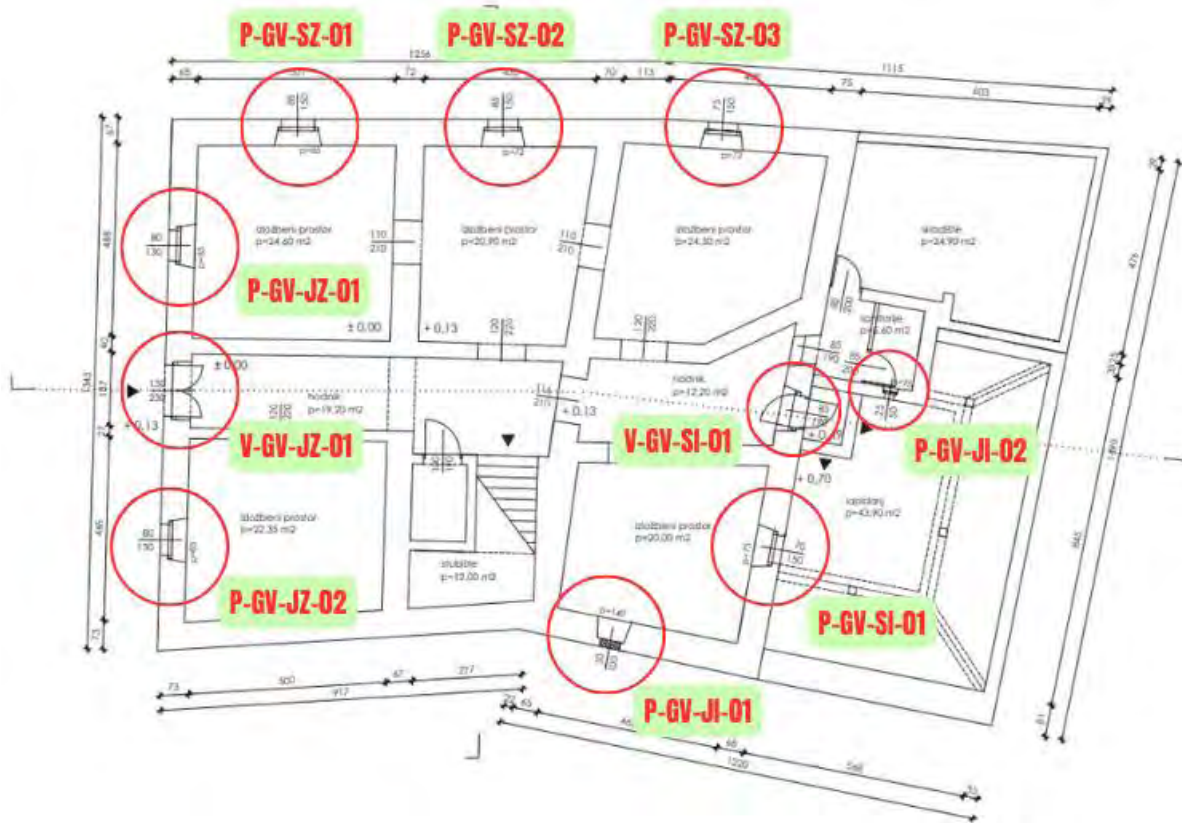
U nastavku je prikazan raspored otvora te popis istih s pripadajućim karakteristikama potrebnim za proračun (Slika 16, Slika 17, Slika 18, Slika 19, Tablica 9).



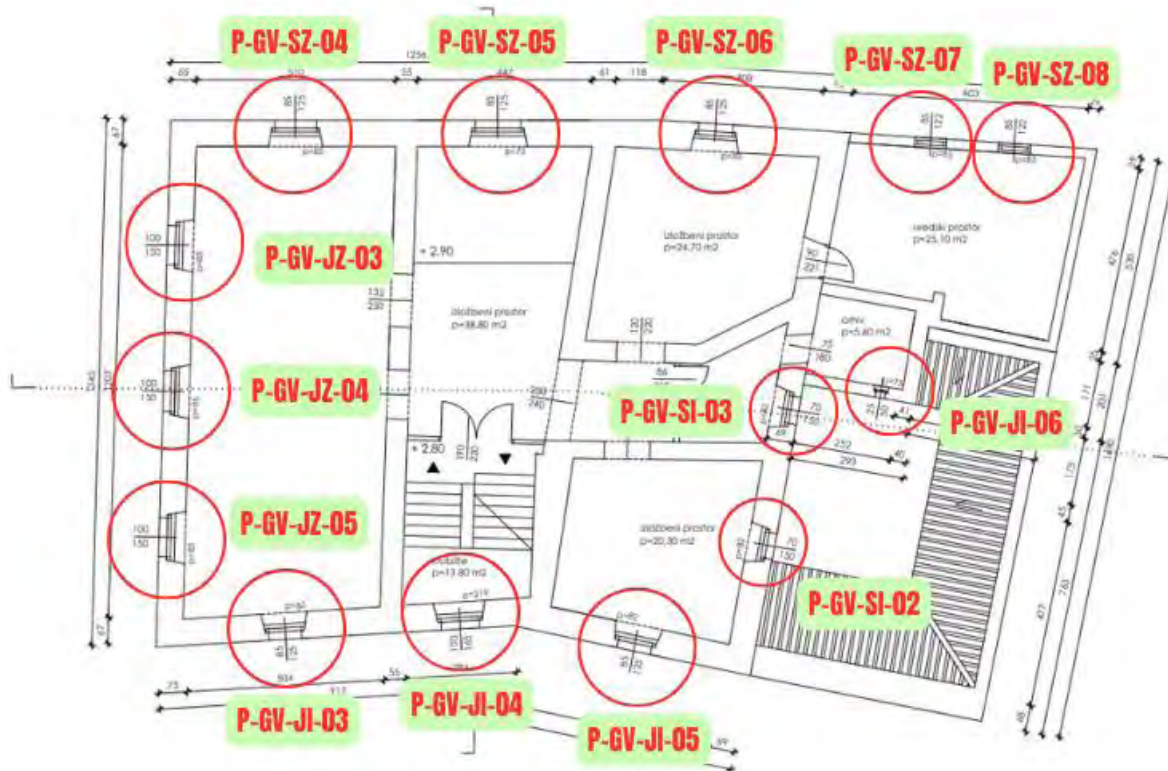
Slika 15. Prozori muzeja bez zasjenjenja

Tablica 8. Karakteristični koefijenti prolaska topline za različite vremenske periode i određene karakteristike otvora [32]

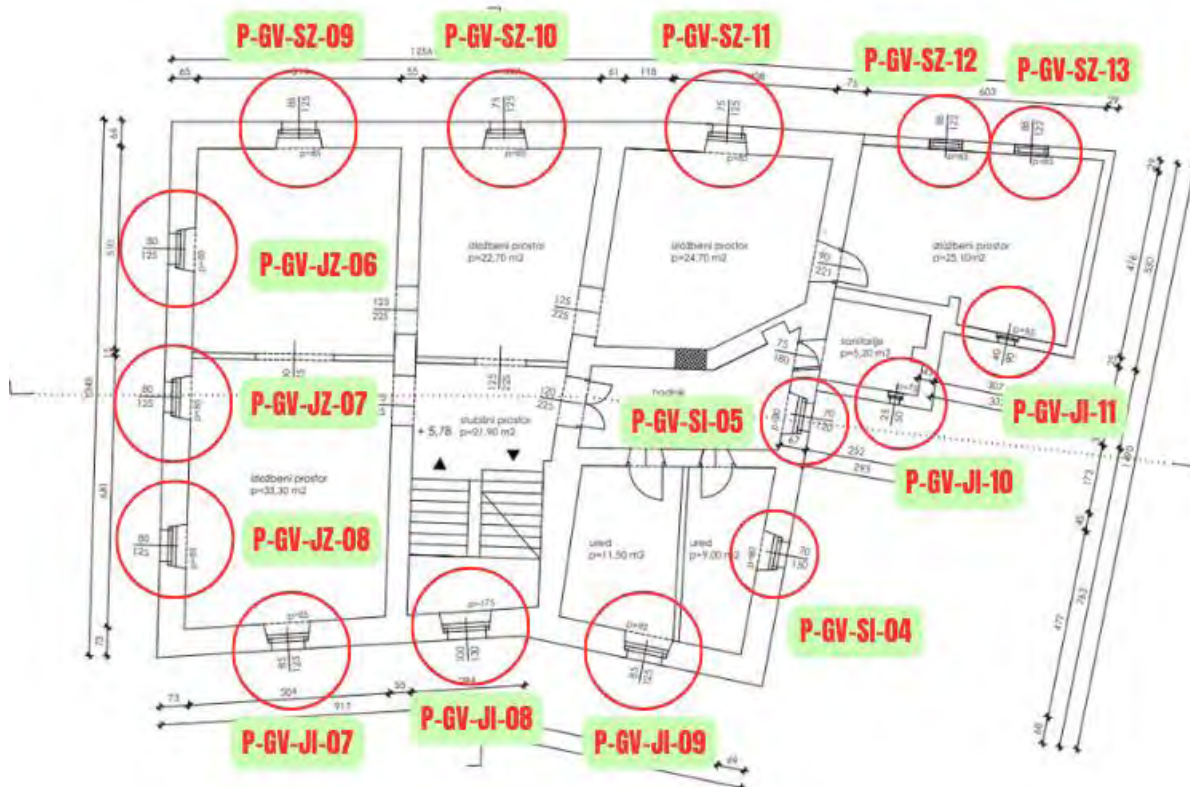
PROZORI	OKVIR		OSTAKLJENJE							
			do 1970.g.		do 1987.g.		do 2006.g.		od 2006.g.	
			1-struko ostakljenje (4 mm) bez brtvljenja	2 x 1-struko ostakljenje (4 mm) 2 doprozornika d=30 cm bez brtvljenja	2-struko obično ostakljenje (4/6-8/4 mm) bez brtvljenja	3-struko obično ostakljenje bez brtvljenja (4/6-8/4/6-8/4 mm)	2-struko izolacijsko staklo (4/10-16/4 mm) i 2-strukim brtvljenjem	2-struko izolacijsko staklo (4/16/4 mm) s plinovitim punjenjem, low _e premazom i 3-strukim brtvljenjem	3-struko izolacijsko staklo (4/16/4/16/4 mm) s plinovitim punjenjem, low _e premazom i 3-strukim brtvljenjem	
Materijal	d [cm]	U [W/m²K]	5,2	5,3	3,4	2,3	2,4-2,1	1,1	0,7-0,5	
Drveni okvir	5	2,9	5,2	3,6	2,9	2,6	-	-	-	
	7	2,4	-	-	-	2,2-2,0	1,4-1,0	1,1	-	
Drvo aluminij s poliuretanom 4 cm	11	0,5	-	-	-	-	1,3	0,9	-	
Metalni okvir bez prekinutog toplinskog mosta	5	5,8	5,9	3,1	4,0	3,2	-	-	-	
Metalni okvir s prekinutim toplinskim mostom	5	3,4	5,9	3,7	3,2	2,6	2,5	1,7	1,4	
Pvc okvir	5-8	2,2-2,0	-	-	3,2	3,4	2,2-2,0	-	-	
	10	1,4	-	-	-	-	1,4	1,0-0,8	-	



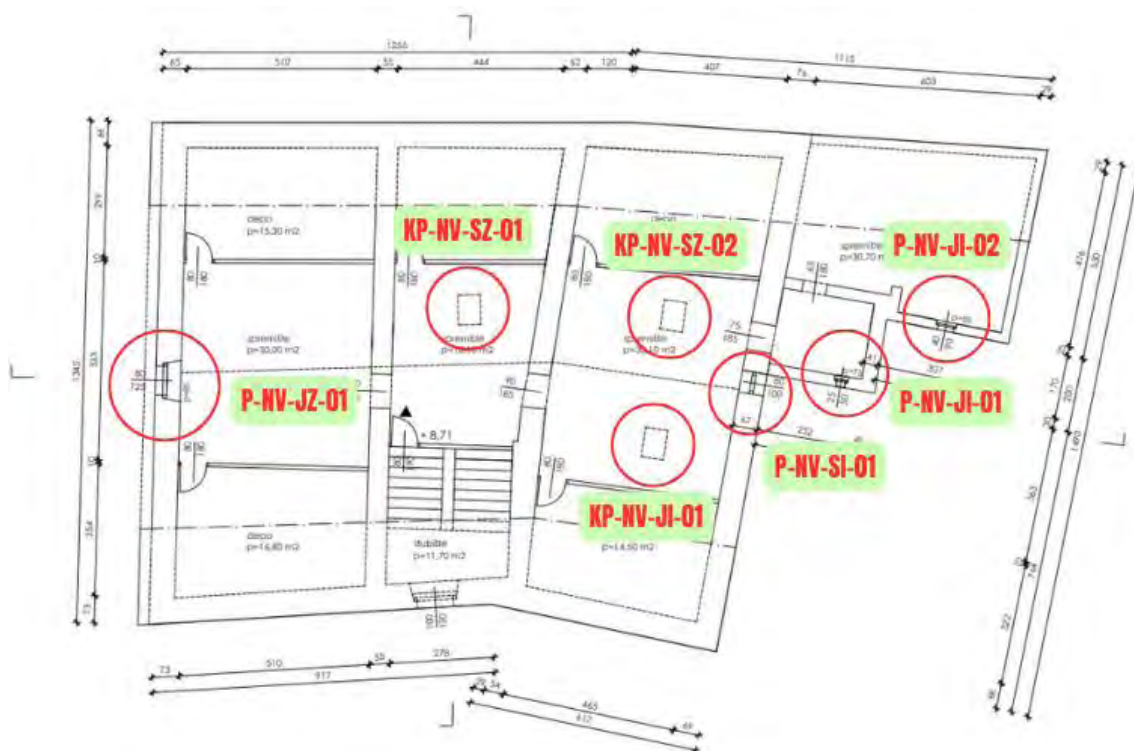
Slika 16. Raspored otvora u prizemlju



Slika 17. Raspored otvora na prvom katu



Slika 18. Raspored otvora na drugom katu



Slika 19. Raspored otvora na tavanu

Tablica 9. Popis i karakteristike otvora (postojeće stanje)

Naziv otvora	Orijentacija	Dimenzije otvora [m]	Aw [m ²]	Kut bočnog zasjenjenja [°]	Kut obzora [°]	Uw [W/m ² K]	n
P - GV - JI - 01	Jl	0,500×1,000	0,5	75	0	5,2	1
P - GV - JI - 05	Jl	0,250×0,500	0,13	11	0	5,2	1
P - GV - JI - 09	Jl	0,850×1,250	0,13	11	0	5,2	1
P - GV - JI - 03	Jl	1,000×1,650	1,06	0	69	5,2	1
P - GV - JI - 04	Jl	0,850×1,250	1,65	0	46	5,2	1
P - GV - JI - 07	Jl	0,250×0,500	1,06	0	0	5,2	1
P - GV - JI - 08	Jl	0,850×1,250	1,06	0	0	5,2	1
P - GV - JI - 02	Jl	1,000×1,300	0,13	75	27	5,2	1
P - GV - JI - 06	Jl	0,850×1,250	0,13	75	0	5,2	1
P - GV - JI - 10	Jl	0,250×0,500	0,13	75	0	5,2	1
P - GV - JI - 11	Jl	0,400×0,900	0,36	66	0	5,2	1
P - GV - JZ - 01	JZ	0,800×1,300	1,04	0	47	5,2	1
P - GV - JZ - 02	JZ	0,800×1,300	1,04	0	76	5,2	1
P - GV - JZ - 03	JZ	1,000×1,500	1,5	0	0	5,2	1
P - GV - JZ - 04	JZ	1,000×1,500	1,5	0	0	5,2	1
P - GV - JZ - 05	JZ	1,000×1,500	1,5	0	67	5,2	1
P - GV - JZ - 06	JZ	0,800×1,250	1	0	0	5,2	1
P - GV - JZ - 07	JZ	0,800×1,250	1	0	0	5,2	1
P - GV - JZ - 08	JZ	0,800×1,250	1	0	35	5,2	1
P - GV - SI - 01	SI	0,700×1,500	1,05	0	28	5,2	1
P - GV - SI - 02	SI	0,700×1,500	1,05	0	0	5,2	1
P - GV - SI - 03	SI	0,700×1,500	1,05	0	0	5,2	1
P - GV - SI - 04	SI	0,700×1,500	1,05	0	0	5,2	1
P - GV - SI - 05	SI	0,700×1,200	0,84	0	0	5,2	1
P - GV - SZ - 01	SZ	0,850×1,500	1,28	0	73	5,2	1
P - GV - SZ - 02	SZ	0,850×1,500	1,28	0	73	5,2	1
P - GV - SZ - 03	SZ	0,750×1,500	1,13	0	78	5,2	1
P - GV - SZ - 04	SZ	0,850×1,250	1,06	0	53	5,2	1
P - GV - SZ - 05	SZ	0,850×1,250	1,06	0	53	5,2	1
P - GV - SZ - 06	SZ	0,850×1,250	1,06	0	71	5,2	1
P - GV - SZ - 07	SZ	0,850×1,220	1,04	0	71	5,2	1
P - GV - SZ - 08	SZ	0,850×1,220	1,04	0	71	5,2	1
P - GV - SZ - 09	SZ	0,850×1,250	1,06	0	0	5,2	1
P - GV - SZ - 10	SZ	0,750×1,250	0,94	0	0	5,2	1
P - GV - SZ - 11	SZ	0,750×1,250	0,94	0	43	5,2	1
P - GV - SZ - 12	SZ	0,850×1,220	1,04	0	43	5,2	1
P - GV - SZ - 13	SZ	0,850×1,220	1,04	0	43	5,2	1
V - GV - JZ - 01	JZ	1,300×2,300	2,99	0	0	3,5	1
V - GV - SI - 01	SI	0,850×1,900	1,62	0	0	3,5	1
P - NV - JI - 01	Jl	0,250×0,500	0,13	75	0	5,2	1
P - NV - JI - 02	Jl	0,400×0,900	0,36	66	0	5,2	1
P - NV - JZ - 01	JZ	0,800×1,250	1	0	0	5,2	1
P - NV - SI - 01	SI	0,800×1,00	0,8	0	0	5,2	1
KP - NV - JI - 01	Jl	0,600×0,800	0,48	0	0	5,2	1
KP - NV - SZ - 01	SZ	0,600×0,800	0,48	0	0	5,2	1
KP - NV - SZ - 02	SZ	0,600×0,800	0,48	0	0	5,2	1

4.3. Građevni dijelovi

Slojevi svih građevnih dijelova dobiveni su na temelju raspoloživih tlocrta i tehničke dokumentacije. Za starije građevine teško je sa sigurnošću odrediti slojeve bez provođenja istražnih radova, stoga je bitno naglasiti kako su slojevi određeni po uzoru na slojeve građevina iz sličnog vremenskog razdoblja [29]. Kratice korištene u tablicama su:

- d [m] – debljina sloja
- ρ [kg/m³] – gustoća
- C [J/kgK] – specifični toplinski kapacitet
- λ [W/mK] – koeficijent toplinske provodljivosti
- μ [-] – faktor otpora difuziji vodene pare

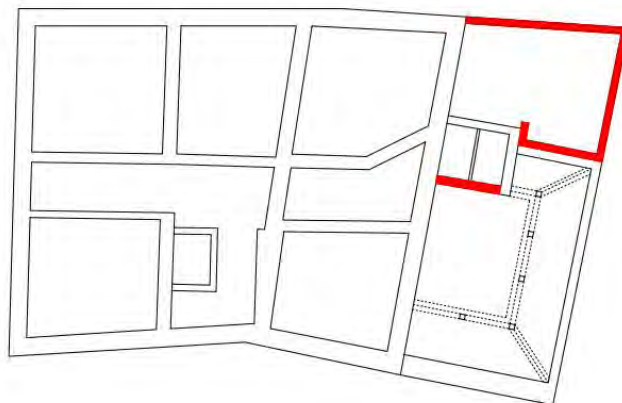
4.3.1. Zidovi na granici grijano – vani (GV)

Zidovi predmetne zgrade su nepravilne tlocrtno dispoziције i nemaju konstantnu debljinu po cijeloj duljini zida što je vidljivo u priloženim tlocrtima u nastavku. Stoga je odabrana prosječna debljina za svaki zid na temelju koje je proveden proračun. Zidovi su obostrano žbukani i nemaju riješen sustav toplinske izolacije niti zaštitu od vlage.

U nastavku, slojevi zidova poredani su u smjeru toplinskoga toka, odnosno iznutra prema vani.

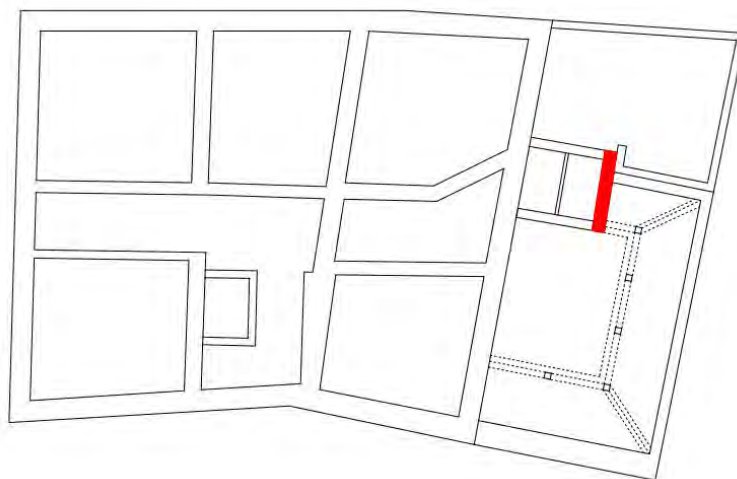
1. Zidovi debljine 25 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	S_d [m]
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30
Šuplji glineni blokovi	25	1100	900	0,480	10,00	2,50
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60
Definirane ploštine [m ²]:					II	57,19
					SI	43,89
					SZ	50,81
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:						1,36



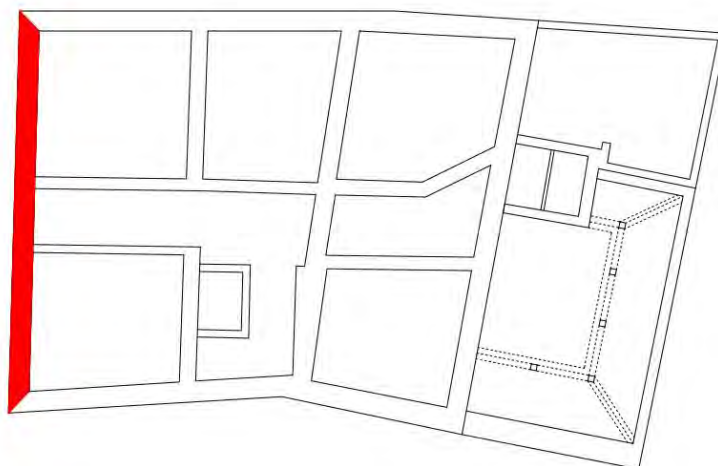
2. Zidovi debljine 37 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Šuplji glineni blokovi	37	1100	900	0,480	10,00	2,50	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						SI	17,51
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]							0,99



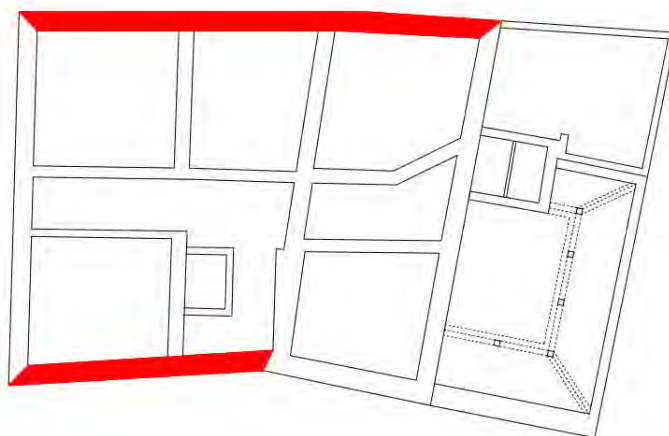
3. Zidovi debljine 57 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Prirodni kamen	57	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						JZ	101,39
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]							1,55



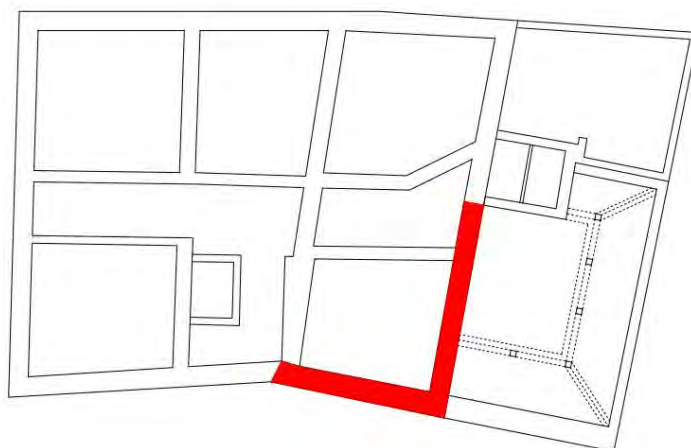
4. Zidovi debljine 62 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Prirodni kamen	62	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	83,41
						SZ	150,26
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:							1,47



5. Zidovi debljine 64 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Prirodni kamen	64	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	50,99
						Sl	61,21
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:							1,44

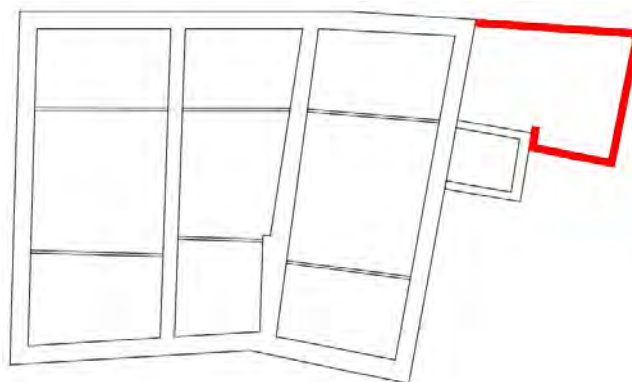


4.3.2. Zidovi na granici negrijano – vani (NV)

Zidovi na granici negrijano – vani razdvajaju tavanski negrijani prostor od okoliša. Nastavljaju se na zidove s granice GV te imaju jednake slojeve kao spomenuti zidovi. U svrhu preglednosti, navode se u nastavku.

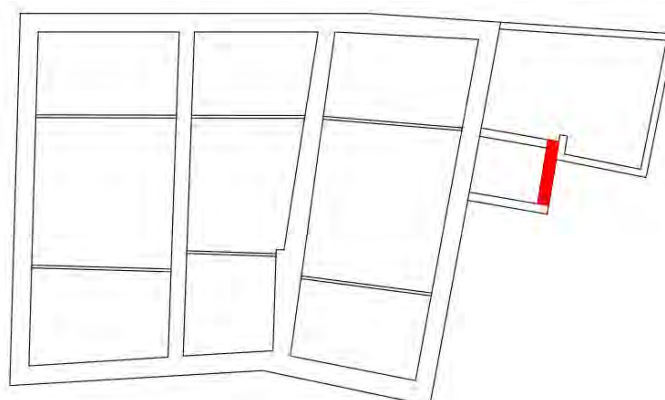
1. Zidovi debljine 25 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30
Šuplji glineni blokovi	25	1100	900	0,480	10,00	2,50
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60
Definirane ploštine [m ²]:					II	12,17
					SI	0,65
					SZ	0,21
Koefficient prolaska topline U [W/m ² K]:						1,36



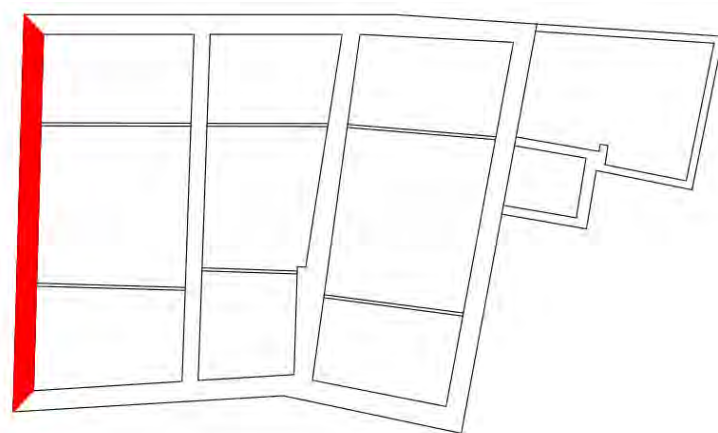
2. Zidovi debljine 37 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30
Šuplji glineni blokovi	37	1100	900	0,480	10,00	2,50
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60
Definirane ploštine [m ²]:					SI	6,47
Koefficient prolaska topline U [W/m ² K]:						0,99



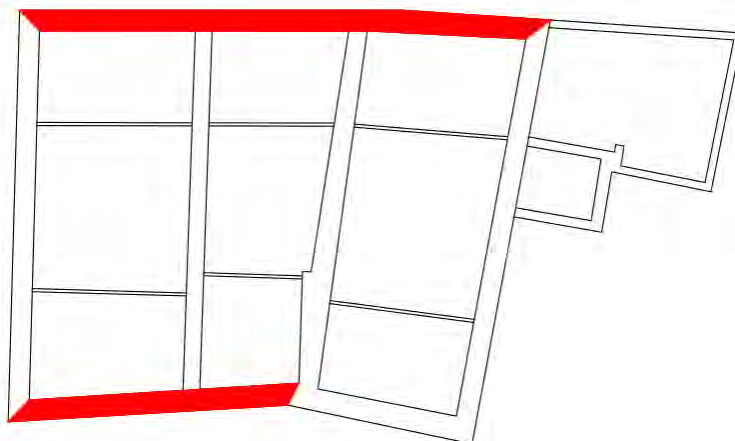
3. Zidovi debljine 57 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Prirodni kamen	57	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						JZ	28,22
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							1,55



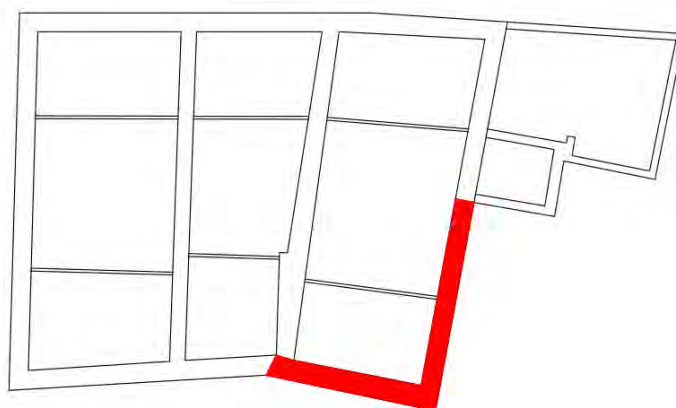
4. Zidovi debljine 62 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30	
Prirodni kamen	62	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	4,64
						SZ	7,35
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							1,47



5. Zidovi debljine 64 cm

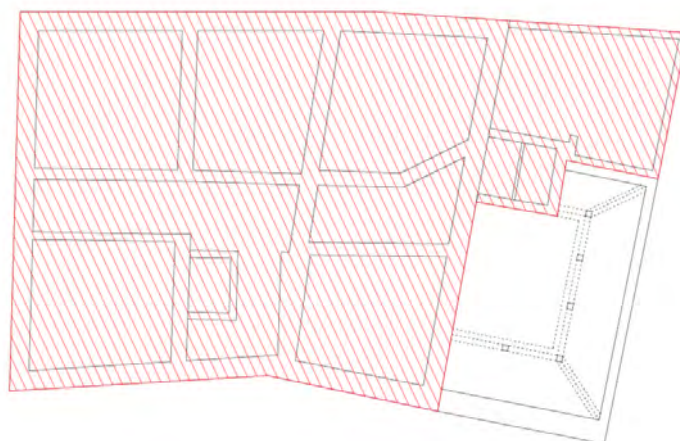
Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Vapnena žbuka	3	1600	1000	0,800	10,00	0,30
Prirodni kamen	64	2000	1000	1,400	50,00	31,00
Vapneno - cementna žbuka	3	1800	1000	1,000	20,00	0,60
Definirane ploštine [m ²]:					II	3,91
					SI	2,4
Koeffcijent prolaska topline U [W/m ² K]:						1,44



4.3.3. Pod na tlu

Bez provođenja razornih ispitivanja, nemoguće je sa sigurnošću odrediti slojeve poda na tlu predmetne zgrade. Stoga su prema debljinama iz nacrtu pretpostavljeni slojevi karakteristični za razdoblje gradnje. Pod je u potpunosti neizoliran.

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Kamene ploče	3,5	2500	1000	2,800	170,00	5,95
Beton	6	2400	1000	2,000	100,00	6,00
Donja betonska podloga	10	1000	1000	0,490	68,00	6,80
Šljunak (drobljenac)	20	1700	1000	0,810	3,00	0,60
Definirana ploština [m ²]:						253,60
Koeffcijent prolaska topline U [W/m ² K]:						1,51



4.3.4. Međukatne konstrukcije

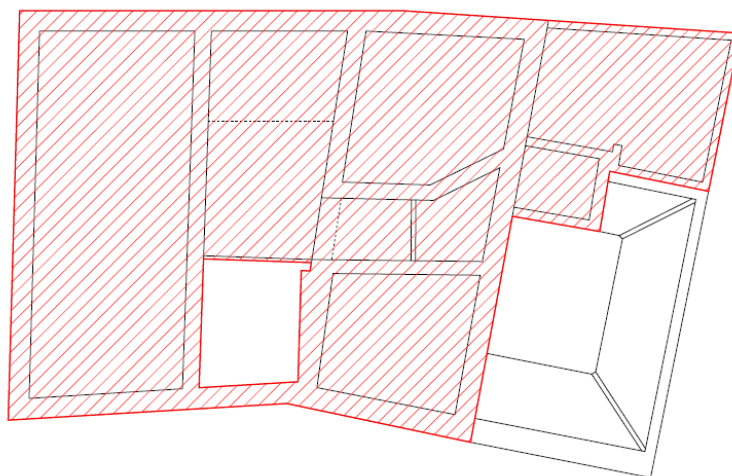
Strop prizemlja, 1. kata i 2. kata imaju jednake slojeve (Slika 20, Slika 21, Slika 22). Stropovi prizemlja i 1. kata nalaze se između grijanih prostorija dok je strop 2. kata nalazi se ispod negrijanoga tavana. Prikazani su slojevi u dva presjeka.

Presjek kroz drveni grednik

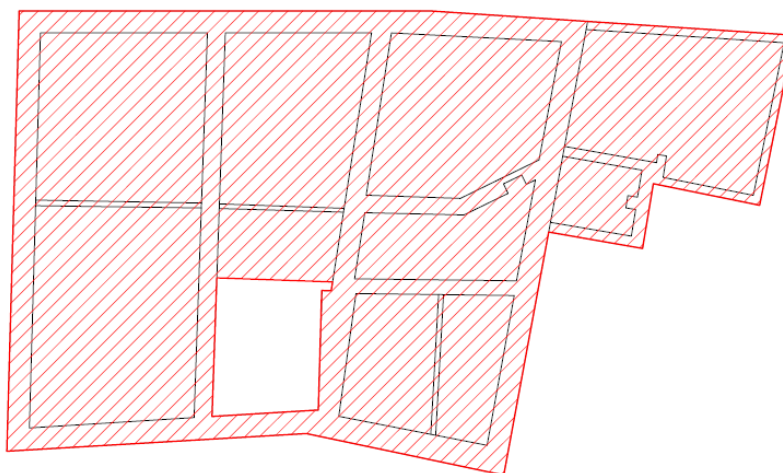
Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Tepih	0,4	200	1300	0,060	5,00	0,02
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	60,00	1,44
Šljunak (drobljenac)	3	1700	1000	0,810	3,00	0,09
Drveni grednici	20	500	1600	0,130	50,00	10,00
Meko drvo (crnogorica)	1,8	500	1600	0,130	50,00	0,90
Trska	0,5	200	1500	0,050	2,00	0,01
Vapnena žbuka	1,5	1600	1000	0,800	10,00	0,15
Definirana ploština [m ²]:						96,56
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,42

Presjek između drvenih grednika

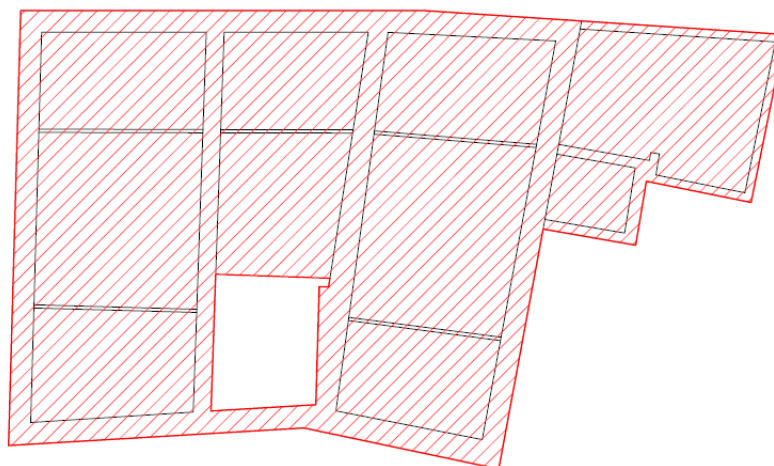
Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Tepih	0,4	200	1300	0,060	5,00	0,02
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	60,00	1,44
Šljunak (drobljenac)	3	1700	1000	0,810	3,00	0,09
Neprovjetravani sloj zraka	20	-	-	-	1,00	0,01
Meko drvo (crnogorica)	1,8	500	1600	0,130	50,00	0,90
Trska	0,5	200	1500	0,050	2,00	0,01
Vapnena žbuka	1,5	1600	1000	0,800	10,00	0,15
Definirana ploština [m ²]:						144,84
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,96



Slika 20. Strop prizemlja



Slika 21. Strop 1. Kata



Slika 22. Strop 2. kata

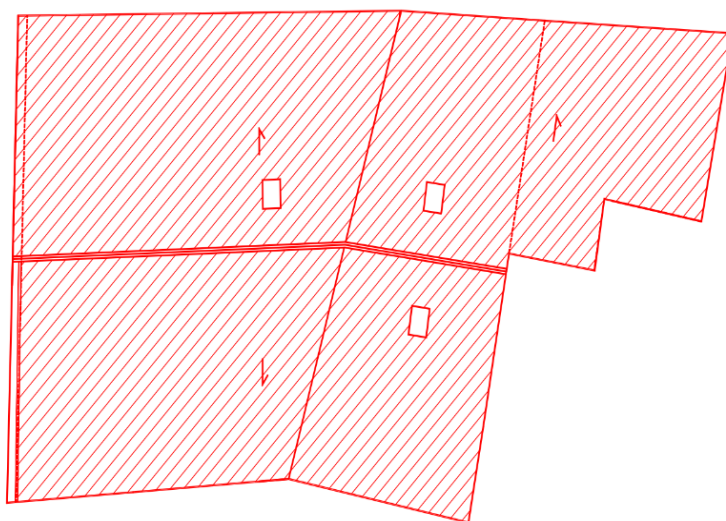
4.3.5. Krov

Presjek kroz rog

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]
Drveni rogovi	18	500	1600	0,130	50,00	9,00
Daščana oplata	2	500	1600	0,130	50,00	1,00
Dobro provjetravan sloj zraka	3	-	-	-	1,00	0,01
Krovni crijep	1,5	2000	900	1,000	40,00	0,60
Definirane ploštine [m ²]:					JI	47,25
					SZ	65,5
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,58

Presjek između rogova (kroz izolaciju)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Daščana oplata	2	500	1600	0,130	50,00	1,00	
Dobro provjetravan sloj zraka	3	-	-	-	1,00	0,01	
Krovni crijep	1,5	2000	900	1,000	40,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	70,86
						SZ	98,27
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							2,83



5. REZULTATI PRORAČUNA POSTOJEĆEG STANJA ZGRADE

Potrebna energija izračunata je u programskom paketu „KI Expert Plus“, u skladu s *Algoritmom za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade*, prema normi HRN EN ISO 13790 [14]. Programski paket obrađuje podatke koji obuhvaćaju geometrijske karakteristike zgrade, klimatske uvjete, termotehničke sustave, građevinske dijelove, otvore, rasvjetu i druge faktore koji mogu utjecati na energetske karakteristike zgrade. Svi uneseni parametri se uzimaju u obzir te se, u skladu sa zahtjevima Tehničkog propisa i Algoritma, izračunava prolazak topline kroz građevinske dijelove, toplinske gubitke i dobitke, potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, te primarnu energiju.

Po završetku proračuna, s obzirom na količinu potrebne i primarne energije zgrada se svrstava u energetske razrede. Na temelju dodijeljenog energetskeg razreda moguće je utvrditi zadovoljava li zgrada nZEB standarde ili je potrebno poduzeti dodatne mjere za poboljšanje energetske svojstava zgrade.

5.1. Proračun građevnih dijelova

Za svaki građevinski dio koji čini ovojnici kondicionirane zone, potrebno je usporediti pripadajući mu koeficijent prolaska topline s maksimalno dopuštenom vrijednošću koeficijenta prolaska topline propisanom u Tablici 1. Priloga B *Tehničkog propisa o racionalnoj upotrebi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.

Nakon provedbe proračuna, ustanovljeno je da niti jedan građevni element ne zadovoljava zahtjeve dane Tehničkim propisom što ne iznenađuje obzirom na razdoblje gradnje predmetne zgrade. Iako predmetna zgrada ima adresu u zaštićenoj kulturno-povijesnoj jezgri grada, odstupanja od maksimalnih vrijednosti su prevelika. Rekonstrukcija je nužna.

Usporedba rezultata proračuna koeficijenata prolaska topline postojećih građevnih dijelova s maksimalno dopuštenim vrijednostima prikazana je u Tablica 10.

NAPOMENA: Međukatne konstrukcije i krov promatrane su u dva presjeka. Presjek koji je imao viši koeficijent prijenosa topline je uzet kao mjerodavan za usporedbu.

Tablica 10. Usporedba rezultata proračuna koeficijenta prolaska topline s maksimalno dopuštenim vrijednostima

Građevni dio	U [W/m ² K]	U _{max} [W/m ² K]	Rezultat
zidovi GV debljine 25 cm	1,36	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 37 cm	0,99	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 57 cm	1,55	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 62 cm	1,47	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 64 cm	1,44	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 25 cm	1,36	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 37 cm	0,99	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 57 cm	1,55	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 62 cm	1,47	0,45	NE ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 64 cm	1,44	0,45	NE ZADOVOLJAVA
pod na tlu	1,51	0,50	NE ZADOVOLJAVA
strop prizemlja	0,96	0,80	NE ZADOVOLJAVA
strop 1. kata	0,96	0,80	NE ZADOVOLJAVA
strop 2. kata	0,96	0,80	NE ZADOVOLJAVA
krov	2,83	0,30	NE ZADOVOLJAVA

5.2. Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje

Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrada je složen proces koji u obzir uzima različite faktore kao što su geometrijske karakteristike, karakteristike građevnih i izolacijskih materijala koji imaju različite koeficijente toplinske provodljivosti, klimatske uvjete te korištenje prostora (broj ljudi, unutarnja temperatura, radni sati, unutarnji izvori topline itd.). Nužno je izračunati toplinske gubitke za proračun potrebne energije za grijanje, te toplinske dobitke za proračun energije potrebne za hlađenje.

Toplinski gubici podrazumijevaju transmisijske toplinske gubitke, ventilacijske gubitke te dodatne gubitke topline u susjedne zone.

Toplinski gubici kroz konstrukciju (transmisijski gubici) računaju se pomoću koeficijenta prolaska topline (U-vrijednost) za svaki element zgrade (zidovi, prozori, krov, podovi). U-vrijednost se računa kao:

$$U = \frac{1}{R}$$

gdje je R toplinski otpor koji se dobije kao zbroj toplinskih otpora slojeva kroz koje toplina prolazi.

Toplinski gubici ventilacijom računaju se na osnovu izmjene zraka u prostorijama, što uključuje prirodnu ventilaciju, infiltraciju i mehaničku ventilaciju.

Ukupni toplinski gubici su zbroj svih toplinskih gubitaka za sve komponente zgrade.

Toplinski dobici podrazumijevaju solarne dobitke, unutarnje izvore topline (ljudi, rasvjeta, električni uređaji itd.) i ostale dobitke npr. zračenje koje dolazi s vanjskim zrakom tijekom ventilacije.

Ukupni toplinski dobici su zbroj svih toplinskih dobitaka.

Toplinski gubici

Grijanje se uključuje kada je temperatura manja od 12°C.

Koeficijent transmisijskih gubitaka H_{Tr} dobiven je prema HRN EN ISO 13790.

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

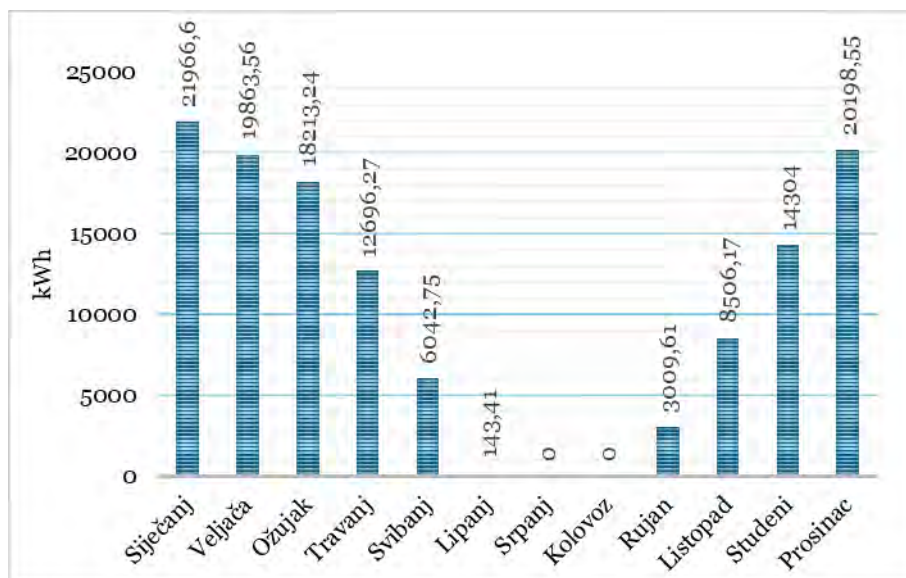
gdje su:

- H_D - Koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu
- $H_{g,avg}$ - Uprosječni koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu
- H_U - Koeficijent transmisijske izmjene topline prema negrijanom prostoru
- H_A - Koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi

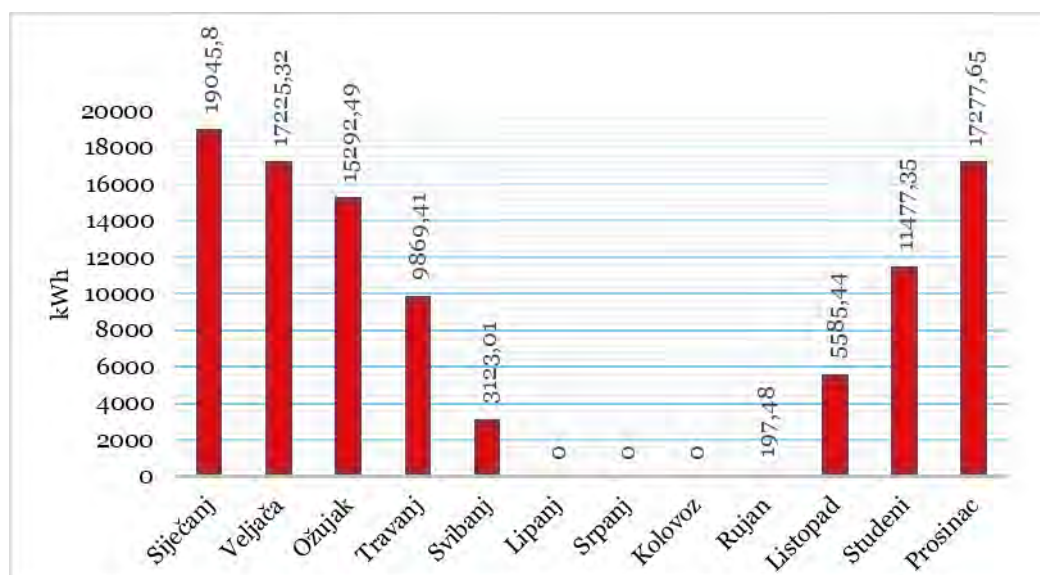
U nastavku su navedeni koeficijenti transmisijske izmjene koji se koriste pri izračunu ukupnih toplinskih gubitaka, odnosno pri izračunu potrebne energije za grijanje i hlađenje. U zgradi ne postoji sustav mehaničke ventilacije, pa ventilacijska izmjena nije uzeta u obzir. Predmetna zgrada je samostojeća, stoga ne postoji izmjena topline prema susjednoj zgradi.

Tablica 11. Transmisijski koeficijent izmjene topline

Koeficijenti za izračun potrebne energije	Vrijednost
Koeficijent transmisijske izmjene prema vanjskom okolišu H_D [W/K]	1084,010
kroz neprozirne građevne dijelove	866,790
kroz otvore	217,220
Uprosječni koeficijent transmisijske izmjene prema tlu $H_{g,avg}$ [W/K]	118,973
Koeficijent transmisijske izmjene kroz negrijani prostor, H_U [W/K]	81,011
Ukupni koeficijent transmisijske izmjene topline H_{Tr} [W/K]	1330,713



Slika 23. Mjesečni toplinski gubici hlađenja Qht,C (postojeće stanje)



Slika 24. Mjesečni toplinski gubici grijanja Qht,H (postojeće stanje)

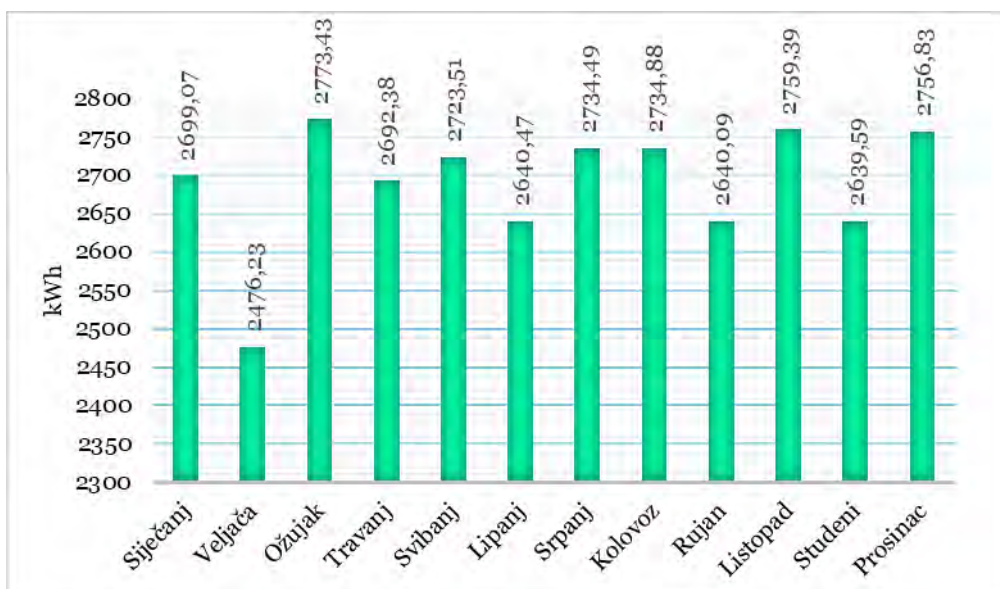
Tablica 12. Ukupni godišnji toplinski gubici grijanja i hlađenja (postojeće stanje)

	Toplinski gubici hlađenja	Toplinski gubici grijanja
[kWh]	124944,15	99093,94

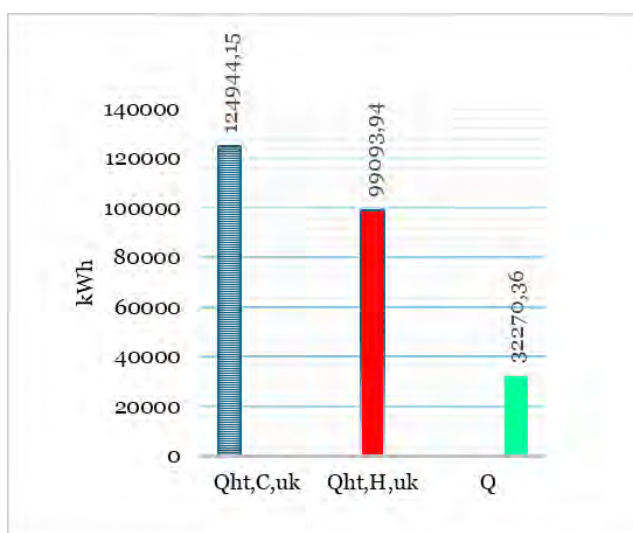
Osim gubitaka topline, u zgradi se generiraju i određeni toplinski dobitci zahvaljujući ljudima koji zgradu koriste povremeno ili stalno, dobitci od rasvjete te solarni dobitci dominantni kroz neprozirne građevinske elemente.

Tablica 13. Toplinski dobici

Dobici energije	Vrijednost [kWh]
Unutarnji toplinski dobici Q_{int}	30.164,71
Solarni toplinski dobici Q_{sol}	2.105,65
Ukupni toplinski dobici	32.270,36



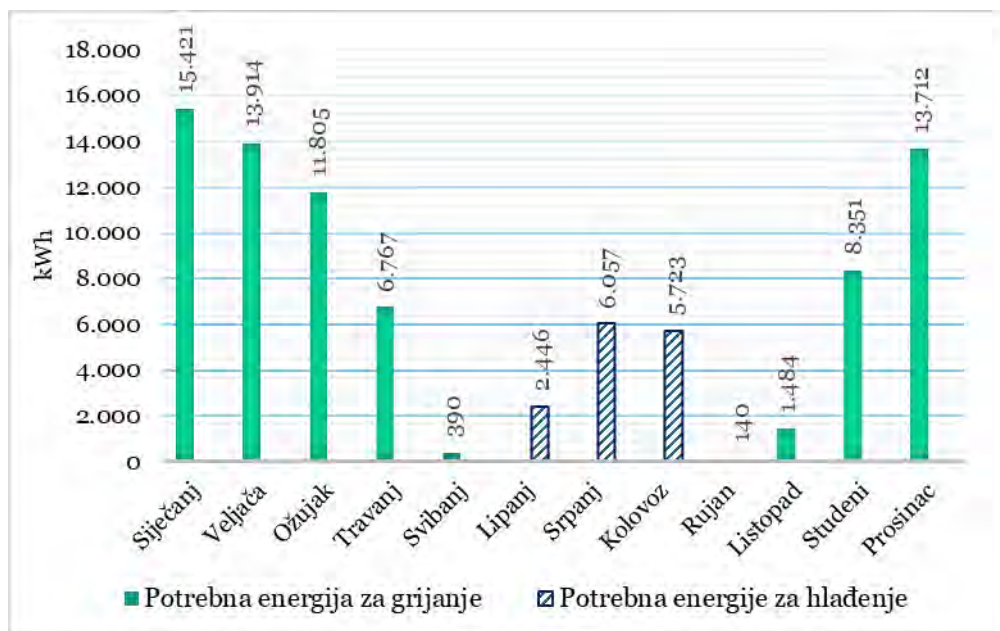
Slika 25. Mjesečni dobici topline (postojeće stanje)



Slika 26. Usporedba toplinskih gubitaka hlađenja, grijanja i toplinskih dobitaka (zeleno) (postojeće stanje)

Iz prikazanog dijagrama na Slika 26 vidljiv je nepovoljan omjer toplinskih gubitaka i dobitaka topline.

Riječ je o zgradi javne namjene – muzeju te se u skladu s tim, kako je ranije i rečeno, za proračun ukupne godišnje potrebne energije uzima u obzir grijanje i hlađenje, dok se priprema tople vode (PTV) ne uzima u obzir. Ukupna godišnja potreba za grijanje iznosi 71844,59 kWh, a za hlađenje 14365,26 kWh.



Slika 27. Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje (postojeće stanje)

Idealna situacija je kada su potrebna energija za grijanje i hlađenje približno jednake, što za postojeće stanje nije slučaj. Jasno je da predmetna zgrada nema povoljna energetska svojstva.

U *Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade*, godišnja potrebna toplinska energija za grijanje definirana je kao računski određena količina topline koju sustav grijanja treba osigurati tijekom jedne godine kako bi održavao unutarnju projektnu temperaturu u zgradi tijekom razdoblja grijanja. Proračun potrebne energije za grijanje temelji se na izrazu [14]:

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{Tr} + Q_{Ve} - \eta_{H,gn}(Q_{int} + Q_{sol}) \text{ [kWh]}$$

gdje je:

- $Q_{H,nd,cont}$ – godišnja potrebna toplinska energije za grijanje [kWh]
- Q_{Tr} – izmijenja toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu [kWh]
- Q_{Ve} – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu [kWh]

- $\eta_{H,gn}$ – faktor iskorištenja toplinskih dobitaka
- Q_{int} – unutarnji toplinski dobitci zgrade [kWh]
- Q_{sol} – solarni toplinski dobitci zgrade [kWh]

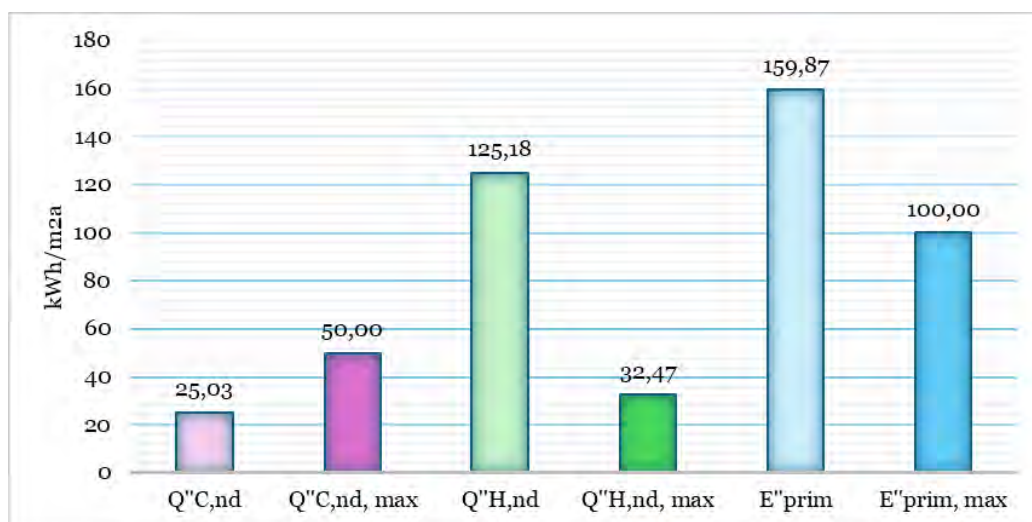
U istom Algoritmu dan je proračun potrebne toplinske energije za hlađenje proračunske zone:

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls} (Q_{Tr} + Q_{Ve}) \text{ [kWh]}$$

gdje je:

- Q_{int} – unutarnji toplinski dobitci zgrade [kWh]
- Q_{sol} – solarni toplinski dobitci zgrade [kWh]
- Q_{Tr} – izmijenja toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu [kWh]
- Q_{Ve} – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu [kWh]
- $\eta_{C,ls}$ – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja

Na temelju navedenog Algoritma proveden je proračun i dobiveni su rezultati koji su uspoređeni s najvećim dopuštenim vrijednostima za postojeće zgrade koje se griju ili hlade na temperaturu od 18°C ili više prilikom rekonstrukcije. Iste vrijednosti propisane su u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.



Slika 28. Usporedba rezultata proračuna i zahtjeva iz Tehničkog propisa (postojeće stanje)

Prikazane veličine na dijagramu (Slika 28):

- $Q''_{C,nd} (max)$ - godišnja potrebna toplina za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine (za stambene i nestambene zgrade)

- $Q''_{H,nd}$ (max) - godišnja potrebna toplina za grijanje po jedinici ploštine korisne površine (za stambene i nestambene zgrade)
- E''_{prim} (max) - ukupna primarna energija po jedinice ploštine korisne površine

Na temelju dijagrama sa Slika 28 može se zaključiti da predmetna zgrada ne ispunjava zahtjeve iz Tehničkog propisa u pogledu specifične godišnje potrebne energije za grijanje i specifične godišnje primarne energije. S druge strane, zahtjevi za specifičnu godišnju potrebnu energiju za hlađenje su zadovoljeni. Isječak iz dobivenog energetskeg certifikata u nastavku pokazuje da je zgrada svrstana u energetski razred D za specifičnu godišnju potrebnu energiju za grijanje, dok je za specifičnu primarnu energiju klasificirana u energetski razred C što ukazuje na potrebu za poboljšanjima u energetskej efikasnosti kako bi se postigli bolji rezultati i usklađenost s propisima.



Slika 29. Isječak iz energetskeg certifikata (postojeće stanje)

6. MJERE ENERGETSKE OBNOVE ZGRADE

Rezultati proračuna energetske svojstava postojećeg stanja pokazali su da predmetna zgrada ne ispunjava standarde za zgrade gotovo nulte energije. Kako bi se zadovoljili zahtjevi propisani standardom, potrebno je provesti energetske obnove zgrade. Energetska obnova uključuje širok spektar zahvata i daleko nadilazi samu primjenu kvalitetnih toplinsko - izolacijskih materijala na vanjskoj ovojnici zgrade. Maksimalna energetska učinkovitost može se postići jedino temeljitom analizom svih čimbenika koji uzrokuju povećane toplinske gubitke te minimiziranjem istih.

Jedan od ključnih koraka za smanjenje toplinskih gubitaka je poboljšanje zrakonepropusnosti vanjske ovojnice. Potonje uključuje prije svega pravilnu ugradnju prozora i osiguranje kvalitetnog brtvljenja na svim građevnim dijelovima. Posebnu pozornost treba posvetiti toplinskim mostovima koji su često izvor značajnih toplinskih gubitaka. Korištenje novih tehnologija za energetske učinkovite termotehničke sustave, kao i ugradnja mehaničke ventilacije, može dodatno smanjiti potrošnju primarne energije.

Također, važno je naglasiti kako za zgrade upisane u Registar kulturnih dobara i druge zgrade u nadležnosti konzervatora mogu postojati određena odstupanja od zahtjeva iz Tehničkog propisa. Odstupanja su dopuštena kako bi se očuvala izvorna arhitektonska i povijesna vrijednost spomenutih zgrada. Dakle, takve zgrade ne moraju nužno zadovoljiti sve propisane standarde. Zbog brojnih zahtjeva konzervatora, preporučuje se primjena mjera koje se mogu provesti bez značajnih intervencija na zaštićenim građevinama. Takve mjere, koje su izvane neprimjetne, mogu se implementirati bez ugroze spomeničkog značaja zgrade.

U skladu s relevantnom literaturom, prema smjernicama za provođenje projekata energetske obnove zgrada koje imaju status kulturnog dobra, radovi na građevini podijeljeni su u nekoliko kategorija:

1. Zahvati na građevnim dijelovima (ugradnja toplinsko-izolacijskih sustava),
2. Zamjena stolarije,
3. Strojarske i elektrotehničke mjere energetske učinkovitosti, uključujući zamjenu postojećeg sustava za proizvodnju energije, uvođenje mehaničke ventilacije s rekuperacijom, zamjenu energenata te zamjenu postojeće rasvjete,
4. Ugradnja fotonapona.

6.1. Zahvati na građevnim dijelovima

6.1.1. Zidovi

Na temelju ranijih proračuna, utvrđeno je kako postojeći zidovi ne ispunjavaju zahtjeve definirane Tehničkim propisom te je stoga nužna energetska obnova. Obzirom da se zgrada nalazi u kulturno-povijesnoj cjelini grada, okružena je uskim pješačkim uličicama te daje svoj doprinos vizurama grada, nije moguće postaviti izolaciju s vanjske strane. Stoga je potrebno toplinske probleme riješiti unutarnjom izolacijom zidova. Planirana izolacija vanjskih zidova prizemlja, prvog, drugog kata i negrijanog tavana bit će izvedena pomoću visokoučinkovite izolacijske aerogel žbuke u debljini od 5 cm. Ista je negoriva, paropropusna, prikladna za unutarnju i vanjsku upotrebu. Aerogelovi su u osnovi izrađeni od hidrofилnih materijala, ali nakon kemijske obrade njihove površine postaju hidrofobne. Proces hidrofobiranja sprječava prodor vode u pore aerogela čak i u ekstremnim uvjetima, tako da hidrofobni aerogel obično nije potrebno dodatno štiti od oborina. Zahvaljujući svojim svojstvima, aerogel žbuka omogućuje značajno povećanje toplinskog otpora građevinskog dijela uz minimalnu debljinu što ne dovodi do velikog smanjenja korisne površine zgrade. [20]

Prije nanošenja aerogel žbuke, zidove je potrebno dobro pripremiti kako bi se osiguralo kvalitetno prijanjanje izolacijskog sloja. Stara vapnena žbuka se pažljivo uklanja s kamenog zida. Nakon uklanjanja žbuke, zid se čisti od prašine, ostataka i labavih dijelova jer je važno osigurati čvrst temelj za daljnje slojeve. Ako postoje oštećenja ili pukotine u zidovima nakon uklanjanja stare žbuke, potrebno ih je popraviti odgovarajućim materijalima (npr. vapneno-cementnim mortom). Kada je osigurana kvalitetna homogena podloga, zidove je potrebno zaštititi od prodiranja vlage nanošenjem impregnacijskog premaza koji omogućava disanje zida, što je važno za održavanje dobrih mikroklimatskih uvjeta unutar zida. Potom se nanosi hidraulični vapneni špric koji je prikladan za renoviranje starogradnje te povijesnih građevina koje spadaju u kategoriju zaštićenih građevina. Ima dobru prionjivost, izjednačava upojnost podloge te je prionjiva podloga za postavljanje aerogel žbuke. Na hidraulični vapneni špric se nanosi aerogel žbuka u debljini od 5 cm, a ista se potom završno obrađuje armiranjem staklenom mrežicom u sloju polimer-cementnog ljepila koji se po završetku gleta. Na aerogel sustav unutarnje izolacije nanose se isključivo mineralne žbuke i premazi zbog optimizacije fizikalnih karakteristika.

Kako bi se osigurala neprekinuta forma izolacije i smanjio učinak toplinskih mostova, potrebno je izolirati i unutarnje zidove koji su povezani s vanjskim u duljini od minimalno 50 cm, obostrano. Na budućim novoizoliranim dijelovima potrebno je ukloniti postojeću žbuku, te u istoj debljini nanijeti sloj aerogel žbuke. Iz istog razloga, potrebno je ukloniti žbuku sa

stropova u širini od minimalno 50 cm od spoja zida i stropa te nanijeti novi sloj aerogel žbuke u istoj debljini. Spojevi različitih vrsta žbuke preklapaju se staklenim mrežicama prije završnog žbukanja. Preporučuje se izvođenje radova u etapama kako bi se pratili eventualni nastali pomaci na građevinskim elementima. [33]

6.1.2. Pod na tlu

Neizolirani podovi na tlu predstavljaju značajan izvor gubitaka topline, što negativno utječe na energetske učinkovitost zgrade, termalnu udobnost i može prouzročiti probleme s vlagom. Izolacija poda ključna je za smanjenje navedenih gubitaka i osiguranje ugodnog i energetski učinkovitog unutarnjeg prostora.

Postojeći pod je u potpunosti neizoliran pa se toplina iz unutrašnjosti zgrade lako prenosi kroz podnu ploču u tlo ispod zgrade. Tlo može učinkovito odvoditi toplinu, posebno ako je vlažno, što dodatno povećava gubitke. Gubici topline preko neizoliranog poda zahtijevaju dodatnu energiju za grijanje kako bi se održala ugodna temperatura unutar zgrade, što znatno povećava troškove grijanja, pogotovo u zimskim mjesecima. Neizolirani podovi su uglavnom hladni na dodir, što smanjuje udobnost u prostorijama. Na takvim površinama postoji velika mogućnost stvaranja kondenzacije, što može uzrokovati probleme s vlagom i plijesni, a vlaga pak uzrokuje oštećenja na podnim oblogama i strukturnim dijelovima zgrade. Na spojevima poda sa zidovima, toplinski gubici su veći i tvore toplinske mostove, gdje toplina intenzivno "bježi" kroz neizolirane dijelove.

Izolaciji poda se također, kao kod zidova, pristupa s unutarnje strane. Nužna je ugradnja termo i hidroizolacije kako bi se izbjegli potonji problemi. Svijetlu visinu prizemlju je nužno smanjiti za ukupno 8,5 cm. Kamene ploče se uklanjaju s postojećeg betona za kojeg se pretpostavlja da je u dobrom stanju, a na njega će se ugraditi plivajući pod. Izolacijski sloj u plivajućim podovima mora imati svojstvo elastičnosti (dinamička krutost) te u isto vrijeme biti nosiv za stalno i pokretno opterećenje.

Beton se čisti i suši od suvišne vlage, a podne neravnine se izravnavaju pomoću nivelirajuće mase. Kao i zidove, postojeći beton je potrebno impregnirati kako bi se spriječila kapilarna elevacija vlage. Potom se postavlja polimer-cementni hidroizolacijski premaz na kojeg se slažu ploče od ekspaniranog polistirena (EPS) u debljini od 3 cm. EPS se od cementnog estriha debljine 5 cm odvaja polietilenskom folijom (PE folija), a na cementni estrih se ponovo slažu kamene ploče ekvivalentne postojećim kamenim pločama.

Jedna od najvećih prednosti polimer-cementnih premaza je njihova paropropusnost. Omogućuju zidovima i podovima da "dišu", dopuštajući prolazak vodene pare, ali sprječavajući prodor tekuće vode. To pomaže u regulaciji vlage unutar konstrukcije i

sprječava kondenzaciju, što je važno za dugotrajnu zaštitu i očuvanje materijala. Isti su često manje štetni za okoliš u usporedbi s npr. bitumenskim premazima, koji sadrže naftne derivate. Nemaju neugodan miris, što ih čini pogodnijima za primjenu u zatvorenim prostorima. Polimer-cementni premazi su otporni na alkalne uvjete kakvi su česti u betonskim pločama, što im osigurava dulji vijek trajanja i pouzdanost. Betonske ploče često s vremenom razvijaju mikropukotine zbog kretanja tla, temperaturnih promjena ili drugih faktora. Polimer-cementni premazi su fleksibilni i mogu premostiti manje pukotine, održavajući nepropusnost sloja. Ovakva hidroizolacija je kemijski kompatibilna s EPS-om, što znači da ne dolazi do reakcija koje bi mogle oštetiti izolacijski materijal ili smanjiti njegovu učinkovitost. Također, EPS ploče dobro prijanjaju na polimer-cementni premaz, što osigurava stabilnu i trajnu podlogu bez rizika od odvajanja slojeva. Ugrađeni EPS istovremeno pruža toplinsku izolaciju i izolaciju od udarnog zvuka ispod cementnog estriha.

6.1.3. Međukatne konstrukcije

Strop prizemlja i prvoga kata nalaze se na granici grijano – grijano i izolirane su na isti način za razliku od stropne konstrukcije drugoga kata prema negrijanom tavanu.

Kada se izolira međukatna konstrukcija između dva grijana prostora, primarni cilj je sprječavanje neugodnih temperaturnih varijacija i osiguranje ravnoteže temperature. Osim toplinske izolacije, često se također koristi akustična izolacija kako bi se smanjio prijenos buke između prostorija. Izbor izolacijskih materijala je fleksibilniji u odnosu na međukatne konstrukcije na granici grijano – negrijano, a debljina izolacije može biti manja jer su toplinski gubici manji u odnosu na granicu između grijanog i negrijanog područja.

Kada se izolira međukatna konstrukcija između grijanog i negrijanog prostora, cilj je smanjiti velike toplinske gubitke koji mogu nastati zbog temperaturnih razlika između grijane i negrijane zone. Potrebno je osigurati dobru toplinsku izolaciju kako bi se spriječilo prodiranje hladnog zraka i smanjila potreba za dodatnim grijanjem u grijanim prostorima. Potrebno je predvidjeti i parnu branu zbog rizika od kondenzacije i vlage.

S međukatnih konstrukcija se uklanjaju svi postojeći slojevi (vapnena žbuka, trska, daščana oplata, sloj šljunka te dotrajali tepisi), izuzev postojećih drvenih grednika za koje se smatra da su u dobrom stanju, odnosno struklaurakuralno čvrsti, spremni prenijeti opterećenja te nisu podlegli truleži, gljivicama i plijesni. Zbog uvođenja sustava mehaničke ventilacije, o čemu će biti govora u nastavku, smanjene su svijetle visine katova, ali vodeći računa da svijetla visina etaže ne bude manja od 250 cm.

6.1.3.1. Strop prizemlja i 1. kata

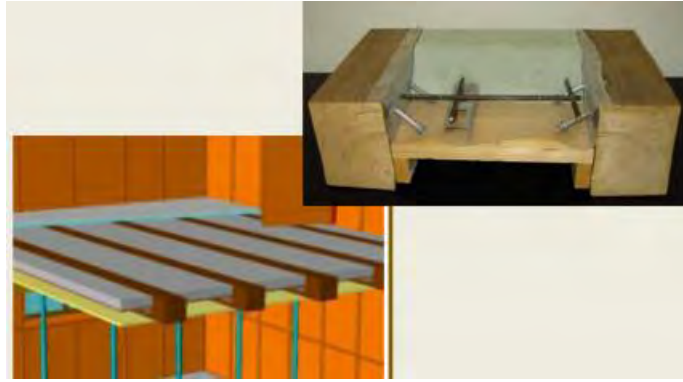
Između drvenih grednika visine 20 cm se umeće mineralna vuna debljine 10 cm koja mora imati dobru prionjivost i popunjavati cijeli prostor između grednika, bez praznina. Praznine mogu smanjiti učinkovitost izolacije i omogućiti toplinske mostove. Sloj mineralne vune se poravnava s gornjim rubom grednika. Takav sustav grednika i mineralne vune se s donje strane oblaže paropropusnom-vodonepropusnom folijom te se zatvara gipskartonskim pločama koje se završno gletaju. Između gipskartonske ploče i mineralne vune ostaje sloj neprovjetranog zraka 10 cm koji također doprinosi toplinskom svojstvu međukatne konstrukcije. Takav sloj smanjuje prijenos topline konvekcijom, što poboljšava ukupni toplinski otpor konstrukcije. Kako bi sloj zraka bio učinkovit kao izolator, mora ostati neventiliran i miran. Ako se zrak počne kretati, toplina se može prenijeti konvekcijom, što značajno smanjuje izolacijski učinak.

Preko drvenih grednika i mineralne vune postavlja se daščana oplata koja se od sljedećeg sloja mineralne vune debljine 12 cm odvaja PE folijom. U sloju mineralne vune iznad grednika je predviđen razvod cijevi mehaničke ventilacije te elektroinstalacija. Na sloj mineralne vune dolaze po dvije ploče suhog cementnog estriha na koje se postavlja novi tepih.

6.1.3.2. Strop 2. kata

Negrijani tavanski prostor je bio skladište za izložke koji nisu izloženi u muzeju na donjim etažama. Nakon rekonstrukcije tavan ostaje namijenjen za skladištenje. Uvidom u stanje međukatne konstrukcije, potrebno je postavljanje poda veće nosivosti u skladu s namjenom, te intervencija u krov koja će spriječiti ulazak vlage, o čemu će biti govora u nastavku.

Po uklanjanju svih slojeva poda s drvenih grednika, potrebno je ojačati konstrukciju sprezanjem grednika s armiranim betonom. Izvodi se tlačna ploča debljine 6 cm. Sprezanjem se znatno povećava nosivost i krutost postojećeg stropa dok je povećanje težine neznatno. Uzimanjem u obzir težine kamenih zidova, povećanje ukupne težine građevine je zanemarivo. Glavna prednost spregnutog stropa je u tome što ne zahtijeva intervencije u nosivu konstrukciju zidova, jer se postojeće grede ne uklanjaju i nema potrebe za izradom novih ležišta za grede. Sprezanjem se znatno povećava nosivost i krutost postojećeg stropa i to na razini armirano betonskih ploča. Kako bi se svijetla visina potkrovlja minimalno smanjila, odabrano je horizontalno sprezanje s tlačnom pločom između greda. [34]



Slika 30. Horizontalno sprezanje [34]

Ispod AB ploče, između drvenih grednika predviđena je toplinska izolacija od mineralne vune debljine 12 cm koja se od armiranog betona odvaja OSB pločama prekrivenim PE folijom kako bi se mineralna vuna i drveni grednici zaštitili od vlage iz betona. Drveni grednici i mineralna vuna se s donje strane skrivaju gipskartonskim pločama koje se završno gletaju. Prije postavljanja gipskartonskih ploča, potrebno je postaviti parnu branu kako bi se spriječio prodor vlage u slojeve toplinske izolacije te u konstruktivne dijelove stropa.

Na drvene grednike i armirani beton dolazi sloj daščane oplata iznad koje dolazi novi sloj toplinske izolacije od mineralne vune debljine 5 cm. Na mineralnu vunu se polaže PE folija te suhi estrih završen lijepljenjem keramičkih pločica.

6.1.4. Krov

Postojeći krov je u potpunosti toplinski neizoliran. Drveni grednici su s vanjske strane obloženi daščanom oplatom za koju se vežu letve i kontraletve na koje se polaže krovni crijep. Toplinski gubici preko krova će se reducirati ugradnjom mineralne vune između i ispod drvenih rogova. Mineralna vuna je ekološki prihvatljiv materijal, ima odlična toplinska i akustična svojstva te je dobar izbor izolacije krovišta zbog svojih protupožarnih svojstava i paropropusnosti. Na daščanu oplatu je potrebno položiti paropropusnu-vodonepropusnu foliju s lijepljivom trakom. Prostor između drvenih grednika i daščane oplata se zapunjava mineralnom vunom. Ispod drvenih rogova zapunjenih mineralnom vunom slaže se dodatni sloj mineralne vune u debljini od 5 cm kako bi se reduciralo stvaranje toplinskih mostova na drvenim rogovima. Isti se s donje strane štiti parnom branom i zatvara gipskartonskim pločama koje se završno gletaju.

Kombinacija paropropusne-vodonepropusne brane izvana i parne brane iznutra osigurava učinkovitu kontrolu vlage unutar krova. Parna brana sprječava ulazak vlage u izolaciju iznutra, dok paropropusna-vodonepropusna brana omogućava isparavanje vlage prema van, istovremeno štiteći izolaciju od vanjskih vremenskih utjecaja.

6.2. Mjere poboljšanja toplinsko-izolacijskih svojstava otvora

Iako su prozori na predmetnoj zgradi dobro očuvani, riječ je o drvenim prozorima s jednostrukim ostakljenjem iz razdoblja do 1970. godine, koji imaju koeficijent toplinske provodljivosti čak $5,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ što je znatno više od maksimalno dopuštene vrijednosti prema Tehničkom propisu koja iznosi $1,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Na zgradi postoje i noviji prozori, ali zbog nedostatka sistematičnih podataka, za sve prozore je uzeto jednako ostakljenje. Toplinski gubici kroz takve prozore su značajni i potrebno ih je zamijeniti. Obzirom da je riječ o zgradi koja nema status pojedinačnog kulturnog dobra, nego taj status uživa kao dio kulturno-povijesne jezgre, postojeće prozore je moguće zamijeniti novima. Prema konzervatorskim preporukama, postojeći prozori se zamjenjuju drvenim prozorima s trostrukim ostakljenjem, s dvostrukim Low-e premazom što dovodi do velikih ušteda energije. Posebnu važnost treba pridati brtvljenju prozora. Novi prozori postavljaju se u skladu s RAL preporukama za montažu.

Postojeća vanjska drvena vrata se neće mijenjati već se korigirati brtvljenje spoja vrata i okvira te okvira i zida.

6.3. Termotehnički sustav

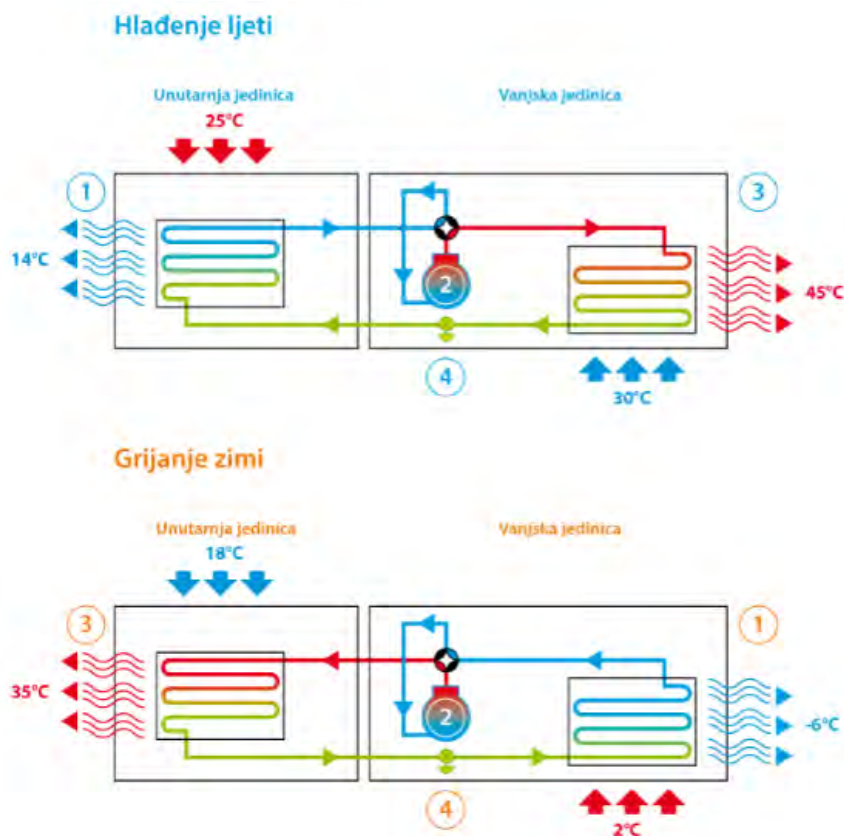
Trenutni termotehnički sustav za grijanje i hlađenje ugrađen je prije nego što su uvedeni sadašnji standardi za zgrade gotovo nulte energije, zbog čega je danas zastario. Takav sustav doprinosi povećanoj potrošnji primarne energije jer dolazi do gubitaka unutar sustava, što rezultira nedovoljnom energetsom učinkovitošću za ispunjenje postavljenih zahtjeva.

Smanjenje primarne energije postiže se ugradnjom dizalica topline. Svi materijali na temperaturi većoj od apsolutne nule zrače u ovisnosti o temperaturi i sadrže barem minimum energije. Dizalica topline prenosi dio energije iz obnovljivih izvora (voda, zrak, tlo, sunce) kao toplinu s jednog mjesta na drugo. Učinkovite su tijekom cijele godine u svrhu grijanja i hlađenja, čak i u hladnijim klimatskim predjelima s vanjskim temperaturama zraka do -25°C . Ne proizvode štetne plinove, a toplina koju uzimaju iz vanjskog zraka, vode ili tla se prirodno obnavlja i čini 75% ukupne energije dizalice topline, dok se preostalih 25% troši na električnu energiju za rad sustava. [35]

Osnovna tri dijela dizalice topline su: vanjska jedinica (isparivač), unutarnja jedinica (kondenzator) i radna tvar. Isparivač izvlači energiju iz zraka, a radna tvar prenosi toplinu cirkulirajući od vanjske do unutarnje jedinice ili više unutarnjih jedinica, koristeći za rad samo

električnu energiju. Isparivač izolira energiju iz obnovljivog izvora pretvorbom tekućine u plin. Kompresor komprimira plin kojemu raste temperatura. Kondenzator izmjenjuje toplinu između sustava plina i sustava grijanja vraćajući plin u tekuće stanje. Ekspanzijski ventil smanjuje tlak radne tvari, pokrećući njeno isparavanje čime započinje novi ciklus. [36]

Princip rada dizalice topline shematski je prikazan u nastavku (Slika 31).



Slika 31. Princip rada dizalice topline [36]

Postoje različite vrste istih obzirom na obnovljivi izvor energije koji koriste [36]:

- Geotermalne dizalice topline
- Dizalice topline zrak-zrak
- Niskotemperaturne dizalice topline zrak-voda
- Visokotemperaturne dizalice topline zrak-voda
- Hibridne dizalice topline

Zbog prostornih i konzervatorskih ograničenja, odabrana je dizalica topline zrak-zrak. Lako se instalira i nešto je povoljnija od drugih opcija. Kako u Biogradu na Moru ne vladaju ekstremni klimatski uvjeti, učinkovitost ovoga sustava je prihvatljiva.

Zahtjevi potrošnje tople vode su minimalni, pa u skladu s tim nema potrebe PTV spajati na dizalicu topline. U sanitarne prostorije se ugrađuje električni bojler odgovarajućeg kapaciteta.

Na sustav dizalice topline moguće je spojiti solarne panele čime se povećava udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji, a odabir istih u skladu s konzervatorskim zahtjevima opisan je posebnom poglavljju.

6.4. Rasvjeta

Postojeće žarulje sa žarnom niti zamjenjuju se LED rasvjetom što rezultira uštedom električne energije do čak 80-90 % ukupne potrošnje. Zamjena žarulja sa žarnom niti LED rasvjetom u muzejima nudi brojne prednosti s obzirom na specifične potrebe i zahtjeve muzejske rasvjete koja se često koristi dugi period tijekom dana. Za muzeje koji koriste ovakvu rasvjetu, preporučene razine osvjetljenja variraju ovisno o faktorima poput vrste izložaka, zahtjeva za konzervaciju i željenog iskustva gledanja. Tipično, razine osvjetljenja u muzejima koji koriste LED rasvjetu mogu varirati od 50 lx (luks) za područja s malo svjetla do 500 lx ili više za područja s detaljnim izlošcima ili gdje je potrebno čitanje. LED rasvjetna tijela mogu se dizajnirati kako bi učinkovito dostavljala određene razine osvjetljenja, pomažući u minimiziranju potrošnje energije dok se održavaju optimalni uvjeti osvjetljenja za posjetitelje i izložke.

Životni vijek LED žarulja je do 50 000 radnih sati, što je 50 puta više od standardnih žarulja sa žarnom niti. Generiraju mnogo manje topline od potonjih. Ne rezultiraju UV zračenjem, niti sadrže živu što ih čini ekološki prihvatljivim izborom. Početna investicija je veća u usporedbi sa standardnim žaruljama, no povrat investicije pri zamjeni je vrlo brz, obično unutar nekoliko mjeseci, ovisno o učestalosti korištenja i lokalnoj cijeni električne energije. Nakon povrata, LED žarulje omogućuju značajne dugoročne uštede.

Standardne LED žarulje obično nude učinkovitost u rasponu od 50 do 150 lm/W. Međutim, napredak u LED tehnologiji svakim danom napreduje, a neke specijalizirane LED žarulje mogu ponuditi i veću učinkovitost.

Primjer:

Ako se za cijeli muzej uzme srednjih 300 lx (lm/m^2), a osrednja žarulja ima npr. 100 lm/W dobije se snaga žarulje od 3 W/m^2 .

Primjenom grubog proračuna na predmetnu zgradu kojoj je korisna površina 736,4 m^2 , dobije se snaga rasvjete $3 \text{ W}/\text{m}^2 \times 736,4 \text{ m}^2 = 2210 \text{ W}$ s kojom je proveden proračun.

6.5. Mehanička ventilacija s rekuperacijom

Kao što je ranije spomenuto, mehanička ventilacija s povratom topline omogućuje unos svježeg zraka izvana u grijani prostor, pri čemu se većina topline zadržava unutar prostora. Ovaj sustav osigurava stalnu opskrbu pročišćenim svježim zrakom, a njegov rad je gotovo neprimjetan. Međutim, ugradnja mehaničke ventilacije u zgrade koje su zaštićene kao kulturna dobra predstavlja izazov jer je teško očuvati izvornost zgrade iz konzervatorske perspektive. U zgradama koje nemaju status pojedinačnog kulturnog dobra, ugradnja takvih sustava može biti jednostavnija, pod uvjetom da se dokaže njihova opravdanost.

Sustavi mehaničke ventilacije s povratom topline mogu biti centralizirani ili decentralizirani. Centralizirani sustavi zahtijevaju više prostora jer uključuju instalaciju odsisnih ventilacijskih kanala i cijevi većih promjera, kao i većih unutarnjih i vanjskih jedinica. Ova instalacija često zahtijeva dodatne građevinske zahvate, poput spuštanja stropova, što može biti problematično s konzervatorskog gledišta jer može ugroziti izvornost zgrade. Problemi se javljaju i s ograničenjem po pitanju visine prostora. Ipak, prednost centraliziranih sustava je njihova prikladnost za zgrade s velikim površinama, posebno za uredske prostore.

Decentralizirani sustav uključuje ugradnju omanjih zidnih rekuperatora topline koji se postavljaju lokalno u prostorije zgrade. Prednost ovog sustava je izbjegavanje ugradnje složene mreže kanala, što pojednostavljuje postupak instalacije mehaničke ventilacije. Ipak, instalacija zahtijeva bušenje rupa u zidovima, što predstavlja izazov obzirom na konzervatorske zahtjeve.

Za rekonstrukciju Zavičajnog muzeja Biograd na Moru predlaže se ugradnja centraliziranog sustava mehaničke ventilacije. Kako zgrada nema status pojedinačnog kulturnog dobra, a uzevši u obzir značajne uštede energije koje se mogu postići korištenjem mehaničke ventilacije s povratom topline, moguće je istovremeno ispuniti konzervatorske zahtjeve i poboljšati energetske karakteristike zgrade.

6.6. Fotonapon

Instalacija fotonapona na građevine koje su pod konzervatorskom zaštitom bila je nemoguća misija do razvoja inovativnih tehnologija kao što su crvene solarne pločice i nevidljivi fotonapon. Mogućnost postavljanja fotonapona na krov predmetne zgrade uvelike olakšava smanjenje toplinskog opterećenja zgrade.

Crvene solarne pločice predstavljaju inovativan pristup integraciji solarne energije u arhitekturu i urbanizam, kombinirajući funkcionalnost solarnih panela s estetikom

građevinskih materijala. Crvene solarne pločice su solarni paneli dizajnirani da izgledaju poput tradicionalnih građevinskih pločica, ali s integriranim fotonaponskim ćelijama. Koriste crvenu boju kao dio dizajna, a proizvode električnu energiju. Obično se proizvode od materijala poput stakla ili keramike s crvenim pigmentom ili premazom.

Kao i kod svih solarnih panela, učinkovitost crvenih solarnih pločica ovisi o kvaliteti fotonaponskih ćelija i njihovoj sposobnosti da pretvore sunčevu svjetlost u električnu energiju. Crvena boja može utjecati na količinu sunčeve svjetlosti koju pločica može apsorbirati. [37]



Slika 32. Crvene solarne krovne pločice [37]

Transparentni fotonapon odnosi se na tehnologiju solarnih panela koja je dizajnirana da bude estetski neprimjetna ili gotovo nevidljiva kada se integrira u zgrade ili druge površine. Ova tehnologija omogućava proizvodnju električne energije iz solarne energije, dok istovremeno ne ometa vizualni izgled zgrade ili površine na kojoj je instalirana. Riječ je o pločama koje izgledaju kao običan krovni crijep, a u sebi sadrže fotonaponske ćelije koje proizvode električnu energiju. Obzirom da su gotovo neprimjetni, idealan su izbor za energetske obnovu predmetne zgrade koje se nalazi u kulturno-povijesnoj jezgri grada u kojoj nije moguće na krov instalirati klasične solarne panele zbog konzervatorskih ograničenja i očuvanja izvornog izgleda. Transparentni ili integrirani solarni paneli mogu imati manju učinkovitost u usporedbi s konvencionalnim panelima zbog ograničenog izlaganja sunčevoj svjetlosti.

Nevidljivi solarni sustav temelji se na principu niske gustoće molekula. Svaki modul izrađen je od reciklirajućeg, netoksičnog polimernog spoja, koji je specifično obrađen kako bi poticao apsorpciju fotona. Uobičajene monokristalne silicijske ćelije ugrađene su unutar modula, dok posebna površina koja je neprozirna za ljudske oči, ali prozirna za sunčeve zrake,

omogućuje ulazak svjetlosti i opskrbu ćelija. Izuzetno je prilagodljiv i može poprimiti izgled glavnih građevinskih materijala (pečena glina, drvo, beton, kamen), nudeći mnoge moguće kombinacije oblika i boja. Estetski izgled zgrada spašen je od narušavanja vizualnog dojma zahvaljujući sustavu koji može zamijeniti uobičajene elemente krovova, obloga i podova, čak i u njihovim funkcionalnim svojstvima. [38]

Zbog svega navedenoga, za energetsku obnovu Zavičajnog muzeja Biograd na Moru odabran je transparentni fotonapon koji je postavljen na krov s jugoistočne strane, a čija efektivna površina iznosi 75 m².



Slika 33. Primjer transparentnih krovnih solarnih pločica [38]

7. REZULTATI PRORAČUNA REKONSTRUKCIJE

U ovom poglavlju prikazane su toplinske karakteristike građevinskih dijelova nakon implementacije prethodno opisanih mjera. Prikazana je količina potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora, te je uspoređena s najvećim dozvoljenim vrijednostima prema Tehničkom propisu. Za razliku od proračuna potrebne energije za postojeće stanje, kod rekonstrukcije se dobivene vrijednosti uspoređuju sa zahtjevima za zgrade gotovo nulte energije.

Geometrijske karakteristike zgrade minimalno su promijenjene u rekonstrukciji, stoga je proračun rekonstruiranog stanja proveden s postojećim geometrijskim karakteristikama koje su navedene u Tablica 6.

Vanjski zidovi muzeja izolirani su s unutarnje strane visokoučinkovitom aerogel žbukom. Rekonstruirane su međukatne konstrukcije s tim da su zadržani drveni grednici koji su bili u dobrom stanju. Stropovi su izolirani mineralnom vunom. Strop 2. kata, na granici s negrijanim tavanom dodatno je ojačan horizontalnim sprežanjem drvenih grednika s AB pločom uz postavljanje dodatnog sloja mineralne vune. Krov je također izoliran mineralnom vunom između drvenih grednika, ali i ispod kako bi se smanjio utjecaj toplinskih mostova. Na krovu je, prema pravilima struke, postavljena parna brana s donje strane (prema unutra) i vodonepropusna-paropropusna folija s gornje strane (prema van).

Postojeći stari prozori s jednostrukim staklima zamijenjeni su prozorima s trostrukim IZO staklom s dvostrukim Low-e. Svi postojeći prozori se ispravno brtve, a postojeće drvene grilje na prozorima su obnovljene i, kao i ranije, pružaju zaštitu od insolacije te čuvaju muzejsku građu od direktnog utjecaja sunčeve svjetlosti.

Termotehnički sustav je optimiziran ugradnjom dizalica topline i ventilacije s rekuperacijom topline. Termotehnički sustav je spojen na transparentni fotonapon postavljen na jugoistočni krov muzeja i tako koristi obnovljive izvore energije. Uveden je LED sustav rasvjete sa detekcijom prisutnosti.

Tablica 14. Popis otvora i pripadajućih karakteristika (rekonstrukcija)

Orijentacija	Dimenzije otvora [m]	A_w [m ²]	Kut bočnog zasjenjenja [°]	Kut obzora [°]	U_w [W/m ² K]	n
Jl	0,500×1,000	0,5	75	0	0,77	1
Jl	0,250×0,500	0,13	11	0	0,77	1
Jl	0,850×1,250	0,13	11	0	0,77	1
Jl	1,000×1,650	1,06	0	69	0,77	1
Jl	0,850×1,250	1,65	0	46	0,77	1
Jl	0,250×0,500	1,06	0	0	0,77	1
Jl	0,850×1,250	1,06	0	0	0,77	1
Jl	1,000×1,300	0,13	75	27	0,77	1
Jl	0,850×1,250	0,13	75	0	0,77	1
Jl	0,250×0,500	0,13	75	0	0,77	1
Jl	0,400×0,900	0,36	66	0	0,77	1
JZ	0,800×1,300	1,04	0	47	0,77	1
JZ	0,800×1,300	1,04	0	76	0,77	1
JZ	1,000×1,500	1,5	0	0	0,77	1
JZ	1,000×1,500	1,5	0	0	0,77	1
JZ	1,000×1,500	1,5	0	67	0,77	1
JZ	0,800×1,250	1	0	0	0,77	1
JZ	0,800×1,250	1	0	0	0,77	1
JZ	0,800×1,250	1	0	35	0,77	1
SI	0,700×1,500	1,05	0	28	0,77	1
SI	0,700×1,500	1,05	0	0	0,77	1
SI	0,700×1,500	1,05	0	0	0,77	1
SI	0,700×1,500	1,05	0	0	0,77	1
SI	0,700×1,200	0,84	0	0	0,77	1
SZ	0,850×1,500	1,28	0	73	0,77	1
SZ	0,850×1,500	1,28	0	73	0,77	1
SZ	0,750×1,500	1,13	0	78	0,77	1
SZ	0,850×1,250	1,06	0	53	0,77	1
SZ	0,850×1,250	1,06	0	53	0,77	1
SZ	0,850×1,250	1,06	0	71	0,77	1
SZ	0,850×1,220	1,04	0	71	0,77	1
SZ	0,850×1,220	1,04	0	71	0,77	1
SZ	0,850×1,250	1,06	0	0	0,77	1
SZ	0,750×1,250	0,94	0	0	0,77	1
SZ	0,750×1,250	0,94	0	43	0,77	1
SZ	0,850×1,220	1,04	0	43	0,77	1
SZ	0,850×1,220	1,04	0	43	0,77	1
JZ	1,300×2,300	2,99	0	0	2,4	1
SI	0,850×1,900	1,62	0	0	2,4	1
Jl	0,250×0,500	0,13	75	0	0,77	1
Jl	0,400×0,900	0,36	66	0	0,77	1
JZ	0,800×1,250	1	0	0	0,77	1
SI	0,800×1,00	0,8	0	0	0,77	1
Jl	0,600×0,800	0,48	0	0	0,77	1
SZ	0,600×0,800	0,48	0	0	0,77	1
SZ	0,600×0,800	0,48	0	0	0,77	1

7.1.1. Zidovi na granici grijano – vani (GV)

1. Zidovi debljine 25 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Šuplji glineni blokovi	25,000	1100	900	0,480	10,00	2,50	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						II	57,19
						SI	43,89
						SZ	50,81
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,40	

2. Zidovi debljine 37 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Šuplji glineni blokovi	37,000	1100	900	0,480	10,00	2,50	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						SI	17,51
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,36	

3. Zidovi debljine 57 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	57,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						IJZ	101,39
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,42	

Zidovi debljine 62 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	62,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	83,41
						SZ	150,26
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:						0,41	

4. Zidovi debljine 64 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	64,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	50,99
						SI	61,21
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:						0,41	

7.1.2. Zidovi na granici negrijano – vani (NV)

1. Zidovi debljine 25 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Šuplji glineni blokovi	25,000	1100	900	0,480	10,00	2,50	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	12,17
						SI	0,65
						SZ	0,21
Koeficijent prolaska topline U [W/m²K]:						0,40	

2. Zidovi debljine 37 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Šuplji glineni blokovi	37,000	1100	900	0,480	10,00	2,50	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						SI	6,47
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,36

3. Zidovi debljine 57 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	57,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						JZ	28,22
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,42

4. Zidovi debljine 62 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	62,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						JL	4,64
						SZ	7,35
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,41

5. Zidovi debljine 64 cm

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,300	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Aerogel žbuka	5,000	220	1000	0,028	5,00	0,25	
Hidraulični-vapneni špric	0,500	1900	1000	0,820	15,00	0,08	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Prirodni kamen	64,000	2000	1000	1,400	50,00	31,00	
Vapneno-cementna žbuka	3,000	1800	1000	1,000	20,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						II	3,91
						SI	2,4
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,41	

7.1.3. Pod na tlu

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Kamene ploče	3,5	2500	1000	2,800	170,00	5,95	
Cementni estrih	5	2000	1100	1,600	50,00	2,50	
Polietilenska folija	0,025	980	1800	0,500	400000,00	25,00	
Ekspandirani polistiren (EPS)	3	21	1260	0,037	60,00	1,80	
Polimer-cementni HI premaz	0,4	1650	1000	0,250	900,00	3,60	
Impregnacijski predpremaz	0,001	1100	1000	1,600	30,00	0,00	
Beton	6	2400	1000	2,000	100,00	6,00	
Donja betonska podloga	10	1000	1000	0,490	68,00	6,80	
Pijesak, šljunak, tucanik (drobljenac)	20	1700	1000	0,810	3,00	0,60	
Definirana ploština [m ²]:							253,60
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,66	

7.1.4. Međukatne konstrukcije

Strop prizemlja i 1. kata (presjek kroz drveni grednik)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Tepih	0,4	200	1300	0,060	5,00	0,02	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Mineralna vuna (MW)	12	25	1030	0,034	1,00	0,12	
Polietilenska folija 0,15 mm	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	60,00	1,44	
Drveni grednici	20	500	1600	0,130	50,00	10,00	
Paropropusna- vodonepropusna folija	0,038	240	1000	0,200	52,00	0,02	
Gipskartonske ploče	1,25	900	900	0,250	8,00	0,10	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	900	0,810	10,00	0,03	
Definirana ploština [m ²]:							96,56
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:						0,17	

Strop prizemlja i 1. kata (presjek između drvenih grednika)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Tepih	0,4	200	1300	0,060	5,00	0,02	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Mineralna vuna (MW)	12	25	1030	0,034	1,00	0,12	
Polietilenska folija	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	50,00	1,20	
Mineralna vuna (MW)	10	25	1030	0,034	1,00	0,10	
Paropropusna - vodonepropusna folija	0,038	240	1000	0,200	52,00	0,02	
Neprovjetravan sloj zraka	10	-	-	-	1,00	0,10	
Gipskartonske ploče	1,25	900	1500	0,250	8,00	0,10	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	1000	0,810	10,00	0,03	
Definirana ploština [m ²]:							144,84
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,14

Strop 2. kata, prema negrijanom tavanu (presjek kroz drveni grednik)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	1000	0,810	10,00	0,03	
Gipskartonske ploče	1,25	900	1500	0,250	8,00	0,10	
Parna brana	0,02	450	1800	0,500	350000,00	20,00	
Drveni grednici	20	500	1600	0,130	50,00	10,00	
Polietilenska folija	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	50,00	1,20	
Polietilenska folija	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Mineralna vuna (MW)	5	25	1030	0,034	1,00	0,05	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Polimerno-cementno ljepilo	0,5	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Keramičke pločice	0,9	2300	840	1,300	200,00	1,80	
Definirana ploština [m ²]:							96,56
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,27

Strop 2. kata, prema negrijanom tavanu (presjek između drvenih grednika)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	1000	0,810	10,00	0,03	
Gipskartonske ploče	1,25	900	1500	0,250	8,00	0,10	
Parna brana	0,02	450	1800	0,500	350000,00	20,00	
Mineralna vuna (MW)	12	25	1030	0,034	1,00	0,12	
Drvene ploče od usmjerenog iverja (OSB)	2	650	1700	0,130	50,00	1,00	
Polietilenska folija	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Armirani beton	6	2500	1000	2,600	110,00	6,60	
Meko drvo (crnogorica)	2,4	500	1600	0,130	50,00	1,20	
Mineralna vuna (MW)	5	25	1030	0,034	1,00	0,05	
Polietilenska folija	0,015	980	1800	0,500	334000,00	15,00	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Gips-kartonska podna ploča F145 suhi estrih	1,25	800	960	0,230	4,00	0,05	
Polimerno-cementno ljepilo	0,5	1650	1000	0,900	14,00	0,07	
Keramičke pločice	0,9	2300	840	1,300	200,00	1,80	
Definirana ploština [m ²]:							144,84
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,17

7.1.5. Krov

Presjek kroz rog

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	1000	0,810	10,00	0,03	
Gipskartonske ploče	1,25	900	1500	0,250	8,00	0,10	
Parna brana	0,02	450	1800	0,500	350000,00	20,00	
Mineralna vuna (MW)	5	25	1030	0,034	1,00	0,05	
Drveni rogovi	18	500	1600	0,130	50,00	9,00	
Daščana oplata	2	500	1600	0,130	50,00	1,00	
Paropropusna-vodonepropusna folija s ljepljivom trakom	0,05	280	1000	0,200	37,00	0,02	
Dobro provjetravan sloj zraka	3	-	-	-	1,00	0,01	
Krovni crijep	1,5	2000	900	1,000	40,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	47,25
						SZ	65,5
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,31

Presjek između rogova (kroz izolaciju)

Materijal	d [cm]	ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	μ [-]	Sd [m]	
Sloj za izravnavanje (glet)	0,3	1800	1000	0,810	10,00	0,03	
Gipskartonske ploče	1,25	900	1500	0,250	8,00	0,10	
Parna brana	0,02	450	1800	0,500	350000,00	20,00	
Mineralna vuna (MW)	5	25	1030	0,034	1,00	0,05	
Mineralna vuna (MW)	18	25	1030	0,034	1,00	0,05	
Daščana oplata	2	500	1600	0,130	50,00	1,00	
Paropropusna-vodonepropusna folija s ljepljivom trakom	0,05	280	1000	0,200	37,00	0,02	
Dobro provjetravan sloj zraka	3	-	-	-	1,00	0,01	
Krovni crijep	1,5	2000	900	1,000	40,00	0,60	
Definirane ploštine [m ²]:						Jl	70,86
						SZ	98,27
Koeficijent prolaska topline U [W/m ² K]:							0,14

Usporedba rezultata proračuna koeficijenata prolaska topline postojećih građevnih dijelova s maksimalno dopuštenim vrijednostima prikazana je u Tablica 15.

Krov nije zadovoljio u presjeku kroz rog i to s odstupanjem od 0,01 W/(m²K) od maksimalno dopuštene vrijednosti. Presjek između rogova zadovoljava propisane zahtjeve.

NAPOMENA: Međukatne konstrukcije i krov promatrani su u dva presjeka. Presjek koji je imao viši koeficijent prolaska topline je uzet kao mjerodavan za usporedbu.

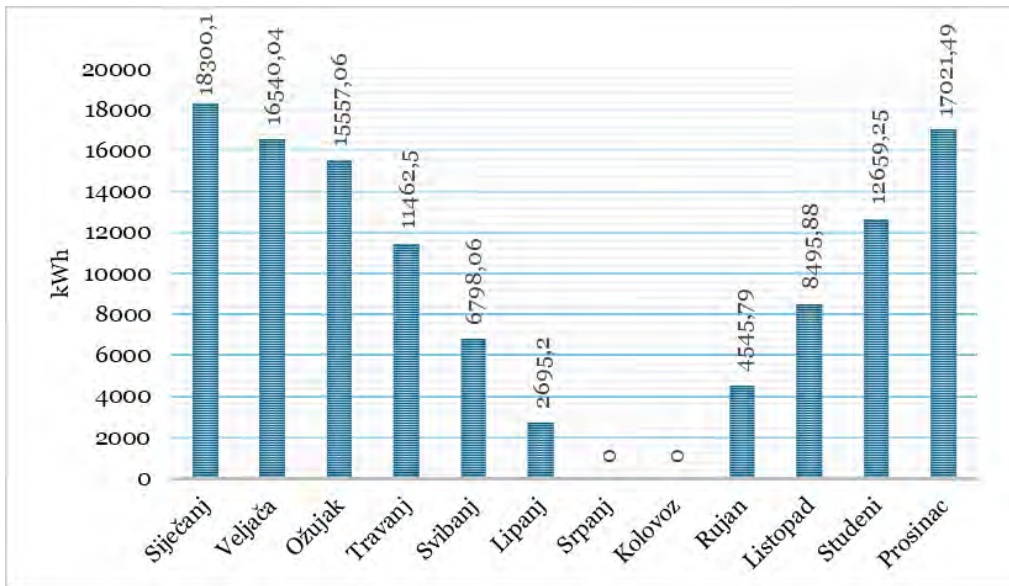
Tablica 15. Usporedba rezultata proračuna koeficijenta prolaska topline s maksimalno dopuštenim vrijednostima (rekonstrukcija)

Građevni dio	U [W/m ² K]	U _{max} [W/m ² K]	Rezultat
zidovi GV debljine 25 cm	0,4	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 37 cm	0,36	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 57 cm	0,42	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 62 cm	0,41	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi GV debljine 64 cm	0,41	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 25 cm	0,4	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 37 cm	0,36	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 57 cm	0,42	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 62 cm	0,41	0,45	ZADOVOLJAVA
zidovi NV debljine 64 cm	0,41	0,45	ZADOVOLJAVA
pod na tlu	0,66	0,50	NE ZADOVOLJAVA
strop prizemlja	0,17	0,80	ZADOVOLJAVA
strop 1. kata	0,17	0,80	ZADOVOLJAVA
strop 2. kata	0,27	0,60	ZADOVOLJAVA
krov	0,31	0,30	NE ZADOVOLJAVA

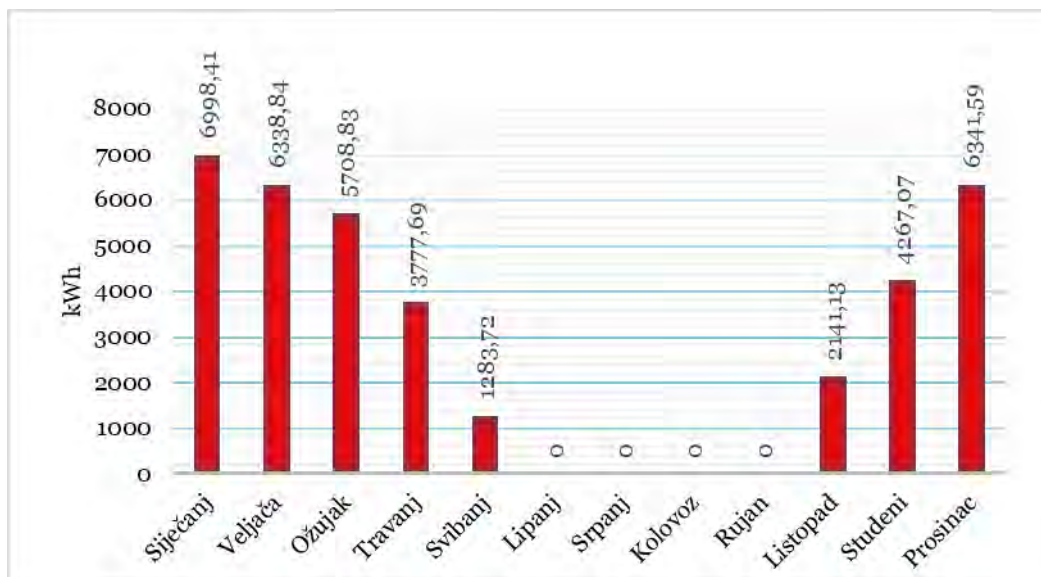
Tablica 16. Transmisijski koeficijent izmjene topline (rekonstrukcija)

Koeficijenti za izračun potrebne energije	Vrijednost
Koeficijent transmisijske izmjene prema vanjskom okolišu H _D [W/K]	349,758
kroz neprozirne građevne dijelove	311,797
kroz otvore	37,961
Uprosječeni koeficijent transmisijske izmjene prema tlu H _{g,avg} [W/K]	148,282
Koeficijent transmisijske izmjene kroz negrijani prostor, H _U [W/K]	98,422
Ukupni koeficijent transmisijske izmjene topline H_{Tr} [W/K]	549,743

Ukupni godišnji gubici hlađenja iznose 114 075,38 kWh, a grijanja 36 857,29 kWh.



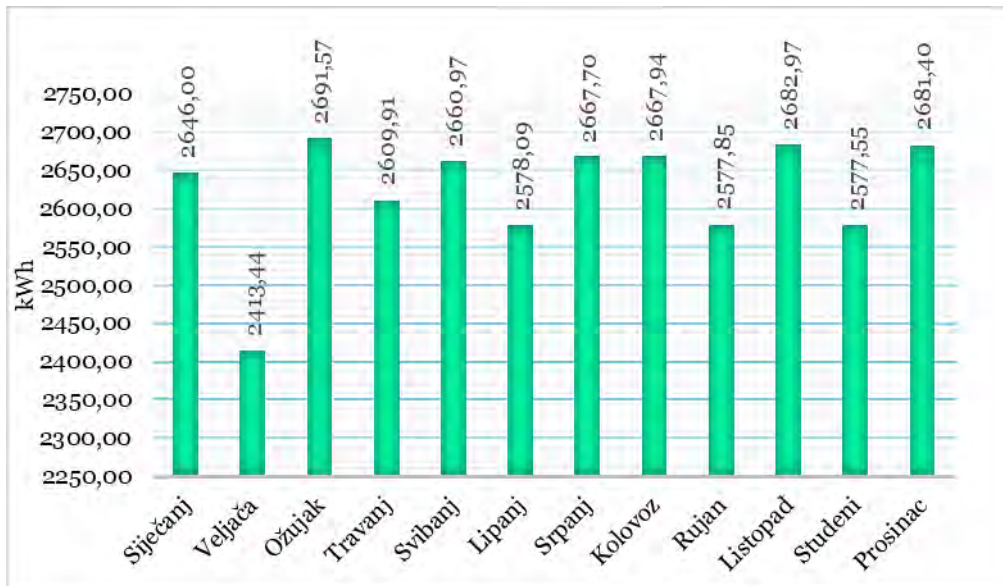
Slika 34. Mjesečni toplinski gubici hlađenja Qht,C (rekonstrukcija)



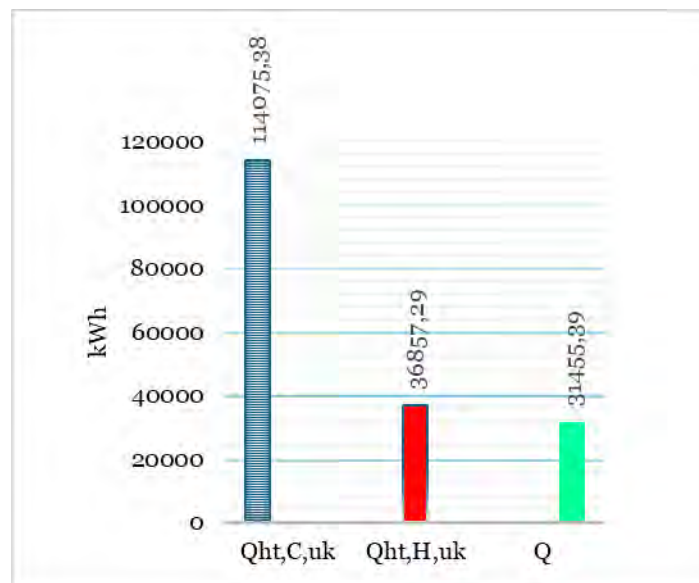
Slika 35. Mjesečni toplinski gubici grijanja, Qht,H (rekonstrukcija)

Tablica 17. Toplinski dobici (rekonstrukcija)

Dobici energije	Vrijednost [kWh]
Unutarnji toplinski dobici Qint	30.164,71
Solarni toplinski dobici Qsol	1.290,68
Ukupni toplinski dobici	31.455,39



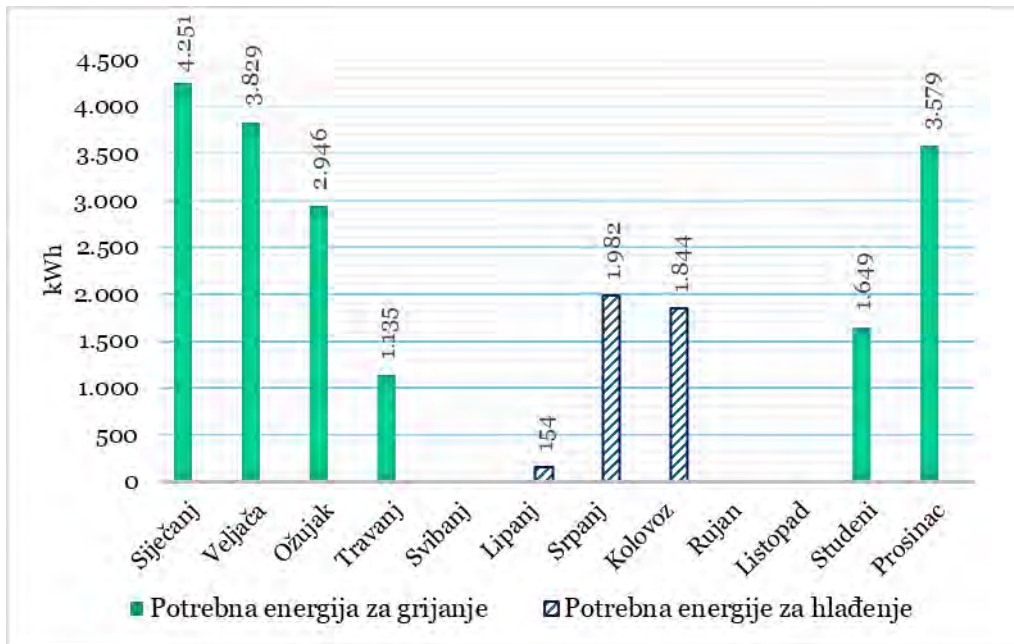
Slika 36. Mjesečni dobici topline (rekonstrukcija)



Slika 37. Usporedba toplinskih gubitaka hlađenja, grijanja i toplinskih dobataka (rekonstrukcija)

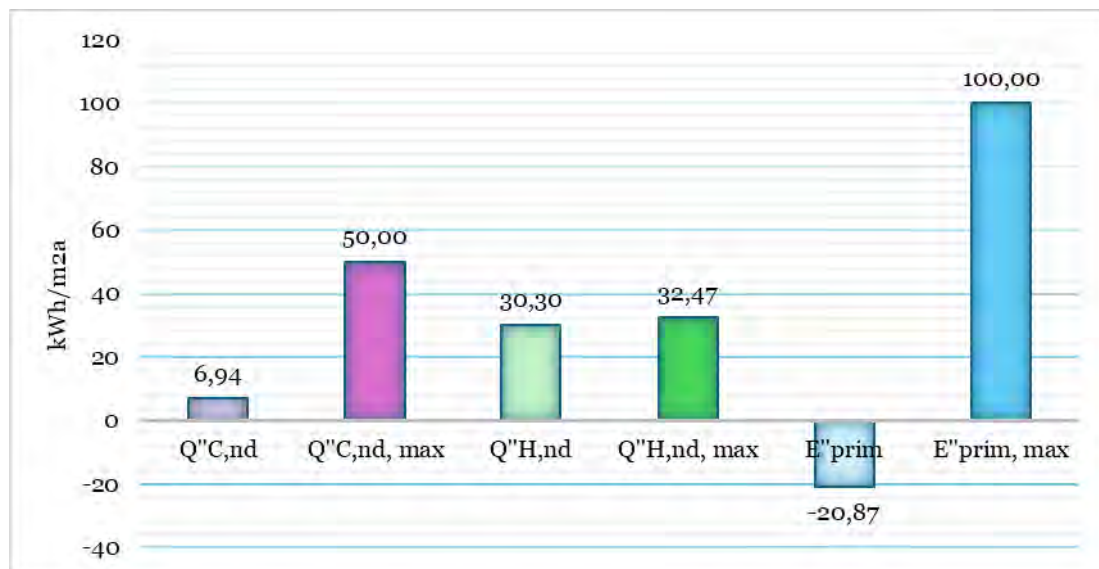
Rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i toplinske energije za hlađenje prema poglavlju VII. *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*, za zgradu grijanu na temperaturu 18°C ili više:

- Ukupna godišnja potreba za grijanje, $Q_{H,nd}$: 17 389,88 kWh
- Ukupna godišnja potreba za hlađenje, $Q_{C,nd}$: 3 980,74 kWh




Slika 38. Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje (rekonstrukcija)

Iz dijagrama (Slika 38) se može uočiti ravnoteža ukupne godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Takav odnos ukazuje na pozitivne učinke energetske obnove.



Slika 39. Usporedba rezultata proračuna i zahtjeva iz Tehničkog propisa (rekonstrukcija)

Predmetna zgrada nakon rekonstrukcije zadovoljava zahtjeve iz Tehničkog propisa vezane za specifičnu godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Zadovoljeni su također zahtjevi za specifičnu godišnju primarnu energiju.

ENERGETSKI RAZREDI ZGRADE	Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}^{*}$ [kWh/(m ² a)]	Specifična godišnja primarna energija E_{prim} [kWh/(m ² a)]
 <p>A+ A B C D E F G</p>	B 25,52	A+ -19,72

Slika 40. Isječak iz energetskeg certifikata (rekonstrukcija)

7.2. Usporedba rezultata proračuna postojećeg stanja i rekonstrukcije

Usporedbom rezultata proračuna postojećeg stanja i proračuna nakon rekonstrukcije zgrade Zavičajnog muzeja Biograd na Moru, projekt energetske obnove se može ocijeniti kao uspješan zbog zadovoljenja kriterija zgrade gotovo nulte energije uz poštivanje konzervatorskih preporuka. Izrazito smanjenje potrebne energije postignuto je smanjenjem transmisivskih gubitaka dodavanjem unutarnje toplinske izolacije, ugradnjom prozora s trostrukim ostakljenjem i dvostrukim Low-e premazom, brtvljenjem otvora kako bi se smanjili gubici infiltracijom, ugradnjom novog termotehničkog sustava, ugradnjom nove štedne LED rasvjete, fotonapona itd.

Usporedba rezultata ukazuje na postizanje najveće uštede u godišnjoj potrebnoj energiji za grijanje. Godišnja potrebna energija za grijanje smanjena je s 71 844,59 kWh na 17 389,88 kWh što je ušteda od 76%. Smanjenje godišnje potrebne energije za hlađenje je nešto skromnije. Proračunom je dobiven pad s 14 365,26 kWh na 3 980,74 kWh, što je također značajno smanjenje od 72%.

Benefiti provedene energetske obnove vidljivi su i kod primarne energije. Uvođenje obnovljivog izvora energije u vidu fotonaponskih ćelija na krovu rezultiralo je smanjenjem primarne energije za čak 113%.

Specifična primarna energija se odnosi na količinu primarne energije potrebne za pokrivanje energetske potrošnje zgrade, uključujući sve pretvorbe i gubitke energije od izvora do krajnje upotrebe. Dakle, smanjenje od 113% drugim riječima znači kako nakon obnove muzej proizvodi više energije nego što mu je potrebno za podmirenje energetskih potreba po jedinici površine (npr. grijanje, hlađenje, rasvjeta, ventilacija). Prema rezultatima, financijski isplativije bi bilo smanjiti površinu fotonapona toliko da zgrada zadovolji zahtjeve iz Tehničkog propisa. Uštede bi svejedno bile velike, a investicija lakša. Međutim, kako je jedan od općih ciljeva ovoga diplomskog rada naglasiti značaj energetske učinkovitosti, samostalnosti i održivosti, odabrano je lokalnom proizvodnjom energije na razini muzeja, dodatno naglasiti energetska neovisnost zgrade. Višak proizvedene energije moguće je pohraniti u baterijske sustave i koristiti u periodima kada proizvodnja iz fotonaponskog sustava nije dovoljna (npr. zimi). S obzirom da je zgrada povezana na elektroenergetsku mrežu, višak energije se također može prodati.

8. PRORAČUN TOPLINSKIH MOSTOVA

Rješavanje toplinskih mostova na zgradama ključno je za smanjenje toplinskih gubitaka kroz vanjsku ovojnicu. Kao što je ranije objašnjeno, toplinski mostovi se dijele na linijske i točkaste. U svrhu pojednostavljenja proračuna, točkasti toplinski mostovi su zanemareni, dok je za linijske toplinske mostove proveden detaljan proračun. Za svaki je detalj toplinskog mosta prikazan geometrijski model s legendom temperaturnih rubnih uvjeta.

Proračun je proveden korištenjem računalnog programa „CRORAL“, koji je interoperabilan s CAD softverima, omogućujući uvoz detalja toplinskih mostova u obliku .dxf datoteka. Nakon uvoza potrebno je definirati karakteristike materijala, poput debljine, toplinske provodljivosti, faktora otpora difuziji vodene pare, i drugih. Osim toga, definiraju se i granični uvjeti, kako bi se na temelju numeričke analize proveo proračun. Kao granični temperaturni uvjeti uzete su temperature od -10°C za vanjski okoliš i 20°C za unutarnji kondicionirani prostor.

Rezultati proračuna uključuju raspored temperaturnih krivulja kroz presjek toplinskog mosta, minimalne i maksimalne temperature na unutarnjim i vanjskim površinama, koeficijent prolaska topline U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), te koeficijent L_{2D} (W/mK), koji se koristi za izračun duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ (W/mK).

Duljinski koeficijent prolaska topline predstavlja povećanje stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most u odnosu na neporemećeno područje, a izračunava se putem izraza:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

Parametri koji ulaze u proračun su [22]:

- L_{2D} – koeficijent iz toplinske veze dobiven iz 2D proračuna komponente koja razdvaja dva okoliša (W/mK),
- N_j – broj 1D komponenata,
- U_j – plošni koeficijent prolaska topline 1D komponente koja promatra dva razdvojena okoliša, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$),
- L_j – duljina na koju se odnosi vrijednost U_j (m)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini zida važna je zbog mogućnosti kondenzacije vodene pare. Kondenzat će se pojaviti na površini kada se postigne kritična kombinacija

minimalne temperature i relativne vlažnosti zraka. Ova kritična kombinacija, poznata kao točka rošenja, može se odrediti pomoću Mollierovog dijagrama. Ako je temperatura zida niža od temperature točke rošenja, doći će do formiranja kondenzata. U uvjetima gdje je unutarnja temperatura zraka 20°C, a relativna vlažnost unutarnjeg zraka 60%, temperatura točke rošenja iznosi 12°C.

Tablica 18. Tablica za određivanje točke rošenja prema Mollierovom dijagramu [39]

Temperatura zraka + °C	Temperatura točke rosišta u °C kod relativne vlažnosti zraka od							
	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	95%
40	23.8	27.7	30.8	33.5	35.9	37.0	38.1	39.1
38	22.0	25.7	28.9	31.6	34.0	35.0	36.1	37.0
36	20.3	24.1	27.0	29.7	32.0	33.1	34.2	35.1
34	18.5	22.2	25.2	27.9	30.1	31.2	32.1	33.1
32	16.7	20.3	23.3	25.8	28.2	29.2	30.2	31.2
30	14.9	18.4	21.4	23.9	26.1	27.2	28.2	29.1
29	14.0	17.6	20.5	23.0	25.2	26.2	27.3	28.2
28	13.1	16.6	19.4	22.1	24.3	25.3	26.2	27.2
27	12.3	15.7	18.6	21.1	23.3	24.3	25.2	26.1
26	11.4	14.8	17.7	20.1	22.3	23.3	24.3	25.2
25	10.5	13.8	16.7	19.1	21.4	22.3	23.3	24.2
24	9.6	12.9	15.7	18.2	20.3	21.4	22.3	23.2
23	8.7	12.0	14.9	17.3	19.4	20.4	21.3	22.2
22	7.8	11.2	13.9	16.3	18.4	19.4	20.3	21.2
21	6.9	10.2	12.9	15.4	17.4	18.4	19.3	20.2
20	6.0	9.3	12.0	14.4	16.5	17.4	18.4	19.2
19	5.1	8.3	11.1	13.4	15.5	16.4	17.4	18.2
18	4.2	7.4	10.1	12.4	14.6	15.4	16.3	17.3
17	3.3	6.5	9.2	11.5	13.6	14.5	15.4	16.2
16	2.5	5.6	8.3	10.6	12.7	13.6	14.6	15.5
15	1.6	4.7	7.4	9.6	11.7	12.6	13.5	14.4
14	0.7	3.8	6.4	8.7	10.7	11.6	12.6	13.4
13	-0.2	2.9	5.4	7.7	9.6	10.5	11.4	12.2
12	-1.1	1.8	4.5	6.7	8.7	9.6	10.5	11.3
11	-2.0	1.0	3.6	5.8	7.7	8.6	9.4	10.2
10	-2.9	0.0	2.5	4.8	6.8	7.7	8.5	9.3
8	-4.7	-1.6	0.7	2.8	4.7	5.6	6.5	7.3
6	-6.5	-3.1	-1.1	0.9	2.7	3.6	4.5	5.4
4	-8.2	-4.9	-2.6	-0.9	0.8	1.6	2.4	3.2

Drugi način za procjenu vjerojatnosti pojave kondenzacije jest pomoću faktora temperature na površini, poznatog kao f_{Rsi} . Ovaj faktor izračunava se prema sljedećem izrazu [22]:

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{Si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)}$$

gdje su:

- θ_{Si} - temperatura na unutarnjoj površini (°C)
- θ_i - unutarnja temperatura zraka (°C)
- θ_e - vanjska temperatura zraka (°C).

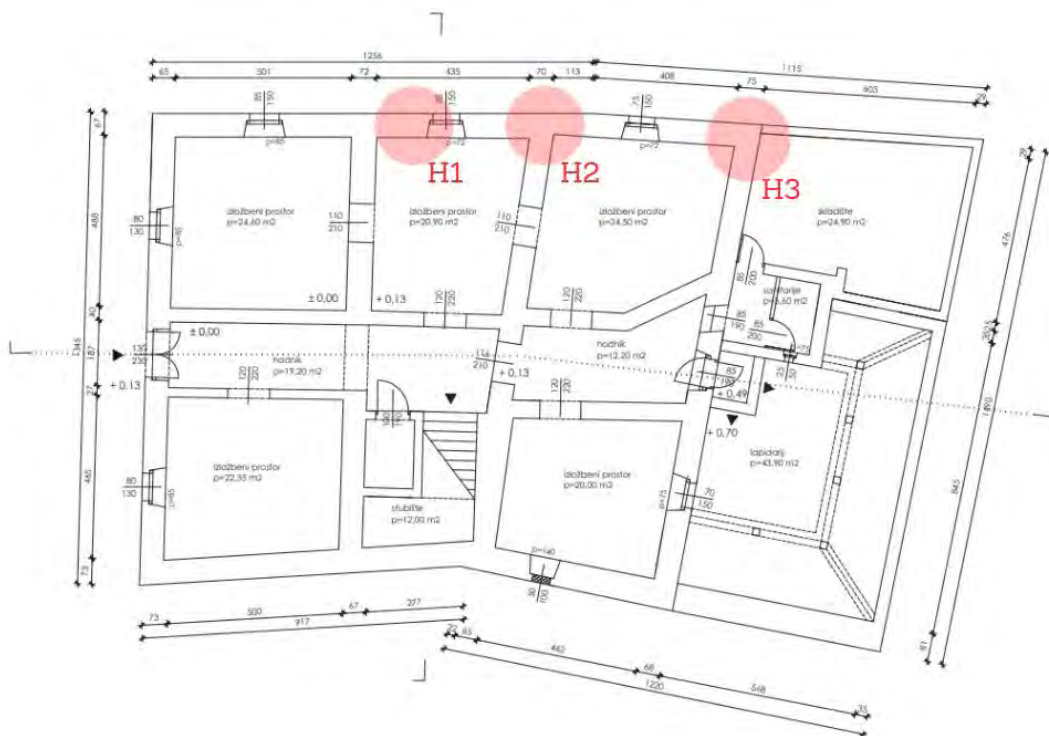
Kada je faktor f_{Rsi} jednak 1, to znači da je temperatura na unutarnjoj površini jednaka temperaturi unutarnjeg zraka. S druge strane, kada je f_{Rsi} jednak 0, temperatura na unutarnjoj površini je jednaka vanjskoj temperaturi zraka. Prema njemačkoj normi DIN 4108, na najosjetljivijem mjestu unutarnje površine građevinskog elementa, pri unutarnjoj

temperaturi zraka od 20°C i relativnoj vlažnosti zraka od 50%, potrebno je održavati temperaturni faktor f_{Rsi} od najmanje 0,7. [40]

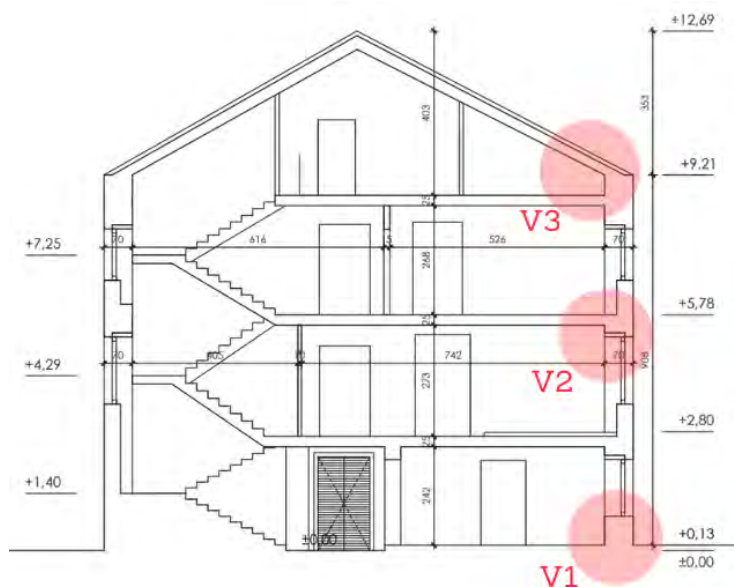
Analizirano je šest kritičnih pozicija na ovojnici zgrade za koje postoji opasnost povećanog toplinskog toka. Prikazane su na slikama u nastavku.

1. H1 – horizontalni spoj nosivog kamenog zida i drvenog prozora
2. H2 – horizontalni spoj nosivih kamenih zidova
3. H3 – horizontalni spoj kamenih zidova i zida od opeke
4. V1 – vertikalni spoj podne ploče na tlu i nosivog kamenog zida
5. V2 – vertikalni spoj kamenog zida i međukatne konstrukcije na granici grijano-grijano
6. V3 – vertikalni spoj krova, vanjskog kamenog zida i međukatne konstrukcije na granici grijano – negrijano

Razrada detalja prikazana je u Prilogu 1., na kraju diplomskog rada.



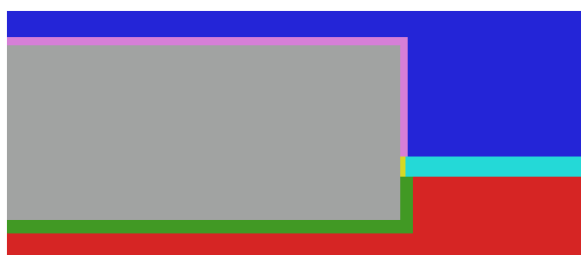
Slika 41. Pozicije potencijalno povećanog toplinskog toka u ovojnici zgrade u tlocrtu



Slika 42. Pozicije potencijalno povećanog toplinskog toka u ovojnici zgrade u presjeku

8.1. Detalj H1

Detalj H1 prikazuje horizontalni spoj kamenog zida i prozora. Za potrebe proračuna toplinskih mostova modelirani su slojevi koji pridonose toplinskom otporu analiziranog detalja i prikazani su u tablici u nastavku, kao i korišteni rubni uvjeti.



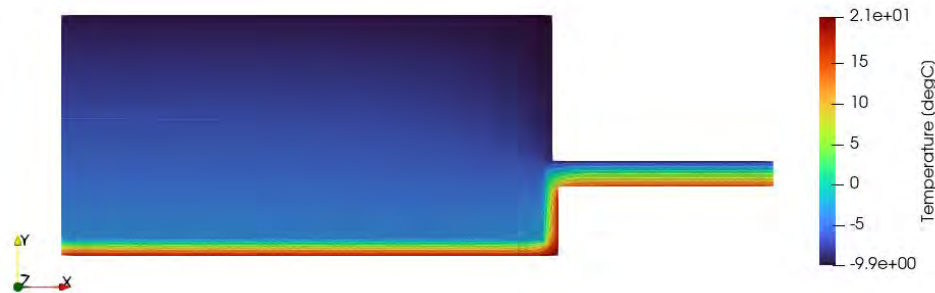
Slika 43. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H1 u CRORAL-u

Tablica 19. Slojevi za detalj H1 u CRORAL-u

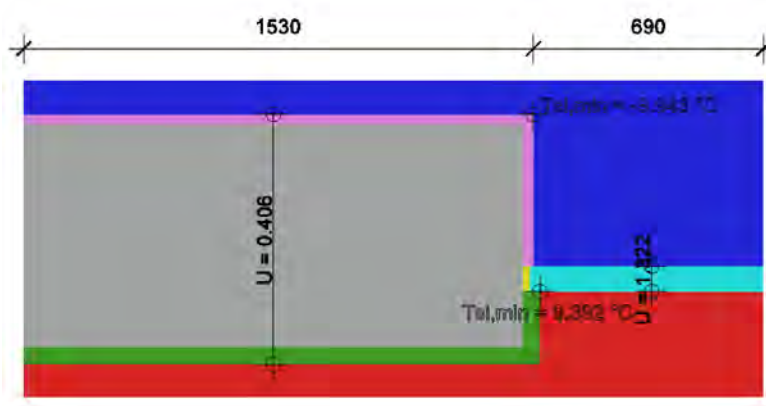
Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
1	AEROGEL	0,028	220	1000	5
2	KAMEN	1,400	2000	1000	50
3	PROZOR	0,130	1	1	100000
4	PUR PJENA	0,023	25	1400	60
5	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20

Tablica 20. Rubni uvjeti za detalj H1 u CRORAL-u

	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	ADIABATIC	-1	0	0



Slika 44. Temperaturni profil detalja H1



Slika 45. Detalj H1 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi 9,392 °C, što je niže od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollietovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(9,392 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,6464$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 64,64% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature, što je relativno niska vrijednost. Kao što je ranije navedeno, smatra se da je sigurna granica 0,7. Kondenzacija u zgradi ovisi o nizu faktora, uključujući temperaturu zraka, relativnu vlažnost zraka, vanjsku temperaturu, izolaciju zgrade i unutarnju ventilaciju,

a svi faktori nisu obuhvaćeni proračunom u CRORALU, pa će se detaljnije analizirati u sljedećem poglavlju.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 1,602 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid} = 0,406 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid} = 1,530 \text{ m}$
- $U_{prozor} = 1,322 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{prozor} = 0,690 \text{ m}$

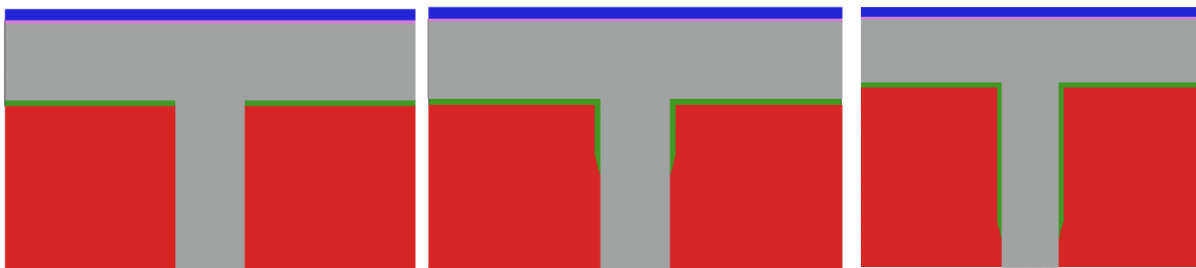
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,602 - 0,406 \cdot 1,530 - 1,322 \cdot 0,690 = 0,068 \text{ W/(mK)}$$

8.2. Detalj H2

Detalj H2 prikazuje spoj vanjskih kamenih zidova s unutarnjim kamenim zidom. Promatran je u tri slučaja kako bi se prikazao utjecaj na toplinski tok prenošenjem aerogel žbuke s vanjskih zidova dijelom i na unutarnje zidove.

1. Prvi slučaj – bez prenošenja toplinske izolacije na unutarnji zid
2. Drugi slučaj – unutarnji zid izoliran aerogel žbukom 0,5 m od spoja s vanjskim zidom
3. Treći slučaj – unutarnji zid izoliran aerogel žbukom 1,5 m od spoja s vanjskim zidom.



Slika 46. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H2 (1.-3. slučaj slijeva nadesno)

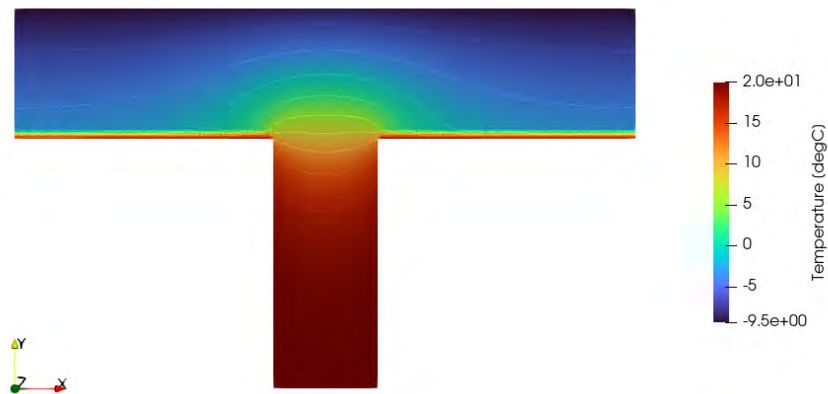
Tablica 21. Slojevi za detalj V2 u CRORAL-u

Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
1	AEROGEL	0,028	220	1000	5
2	KAMEN	1,400	2000	1000	50
3	PROZOR	0,130	1	1	100000
5	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20

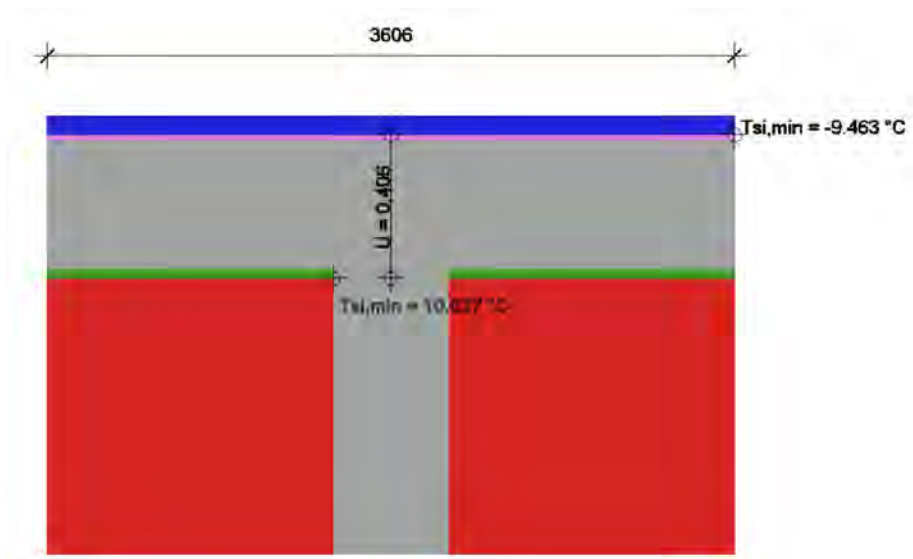
Tablica 22. Rubni uvjeti za detalj V2 u CRORAL-u

Legenda	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	ADIABATIC	-1	0	0

8.2.1. Prvi slučaj



Slika 47. Temperaturni profil detalja H2 (prvi slučaj)



Slika 48. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (prvi slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi 10,627°C, što je niže od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(10,627 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,6876$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 68,76% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,6876 je manji od sigurne granice 0,7.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

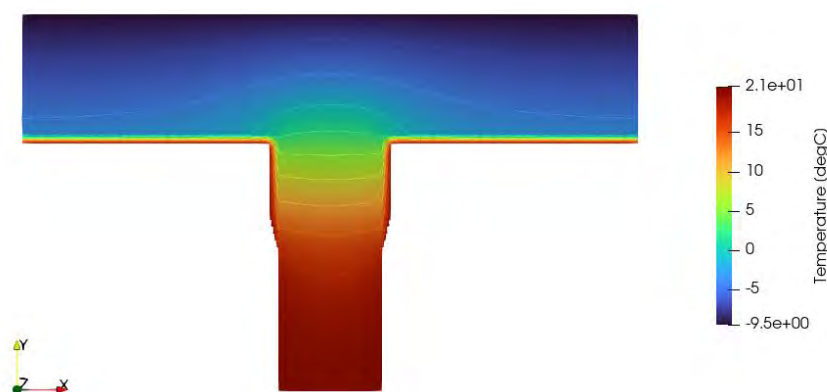
Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 2,207 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid} = 0,406 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid} = 3,606 \text{ m}$

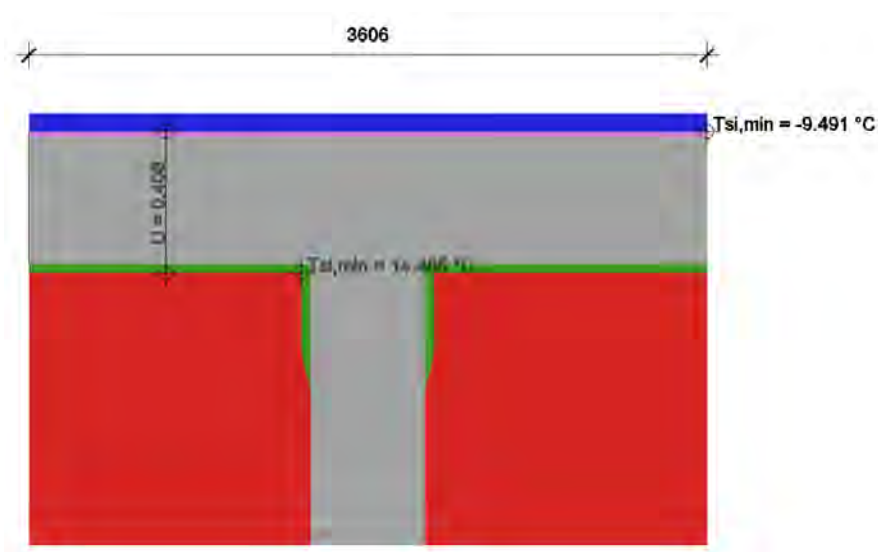
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 2,207 - 0,406 \cdot 3,606 = 0,743 \text{ W/(mK)}$$

Drugi slučaj



Slika 49. Temperaturni profil detalja H2 (drugi slučaj)



Slika 50. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (drugi slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $14,465^{\circ}\text{C}$, što je više od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(14,465 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,8155$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 81,55% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,8155 je veći od sigurne granice 0,7, što znači kako nema rizika pojave kondenzacije.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

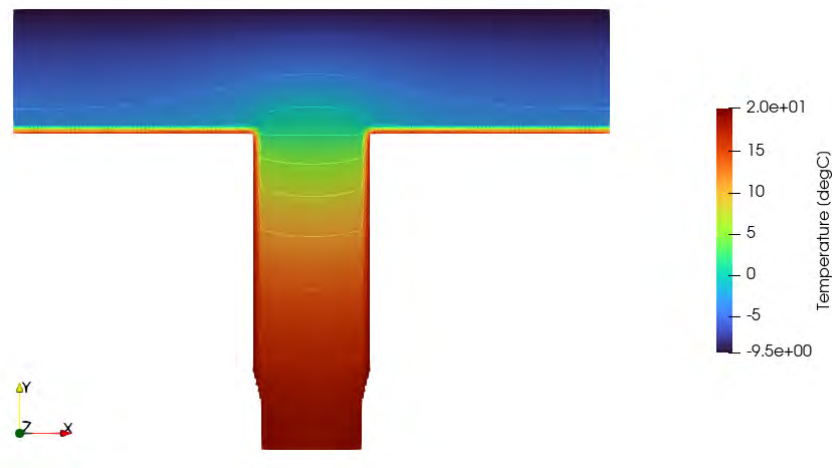
Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 1,835 \text{ W}/(\text{mK})$
- $U_{zid} = 0,406 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- $L_{zid} = 3,606 \text{ m}$

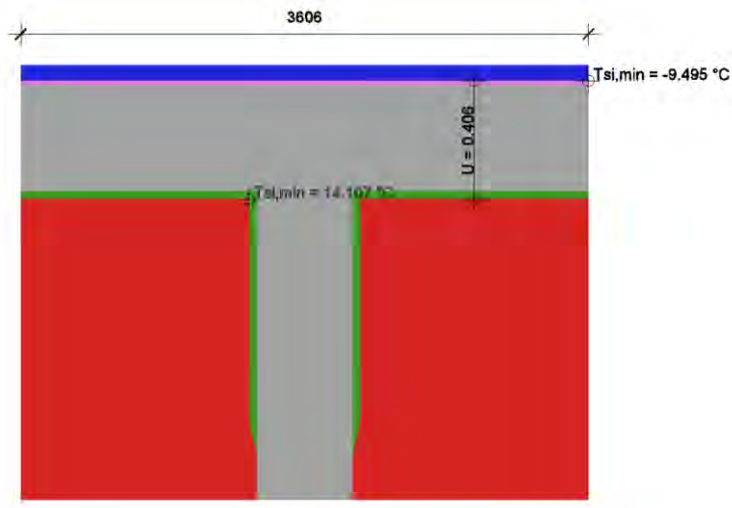
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,835 - 0,406 \cdot 3,606 = 0,371 \text{ W}/(\text{mK})$$

8.2.2. Treći slučaj



Slika 51. Temperaturni profil detalja H2 (treći slučaj)



Slika 52. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (treći slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $14,107 \text{ } ^\circ\text{C}$, što je više od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(14,107 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,8036$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 80,36% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,80,36 je veći od sigurne granice 0,7, što znači kako nema rizika pojave kondenzacije.

Uočava se veća vrijednost f_{Rsi} za drugi slučaj što implicira kako je unutarnje zidove dovoljno izolirati 0,5 m od spoja s vanjskim zidom kako ne bi došlo do problema s kondenzacijom na promatranoj poziciji i sličnim pozicijama.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 1,739 \text{ W/(mK)}$
- $L_{zid} = 3,606 \text{ m}$

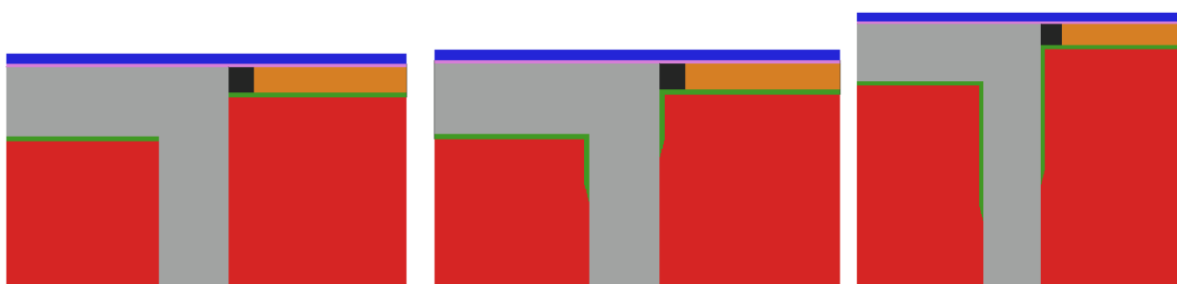
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,739 - 0,406 \cdot 3,606 = 0,275 \text{ W/(mK)}$$

8.3. Detalj H3

Detalj H3 prikazuje horizontalni spoj kamenih zidova i zida od opeke. Kao i detalj H2, promatran je u tri slučaja kako bi se prikazao utjecaj na toplinski tok prenošenjem aerogel žbuke s vanjskih zidova dijelom i na unutarnje zidove.

1. Prvi slučaj – bez prenošenja toplinske izolacije na unutarnji zid
2. Drugi slučaj – unutarnji zid izoliran aerogel žbukom 0,5 m od spoja s vanjskim zidom
3. Treći slučaj – unutarnji zid izoliran aerogel žbukom 1,5 m od spoja s vanjskim zidom.



Slika 53. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H3 (1.-3. slučaj slijeva nadesno)

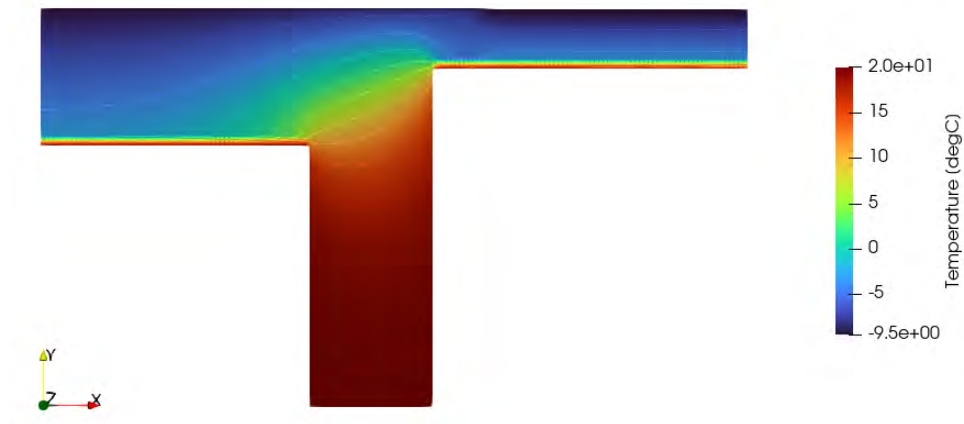
Tablica 23. Slojevi za detalj H3 u CRORAL-u

Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
1	AB	2,600	2500	1000	110
2	AEROGEL	0,028	220	1000	5
3	KAMEN	1,400	2000	1000	50
4	PROZOR	0,480	1100	900	10
5	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20

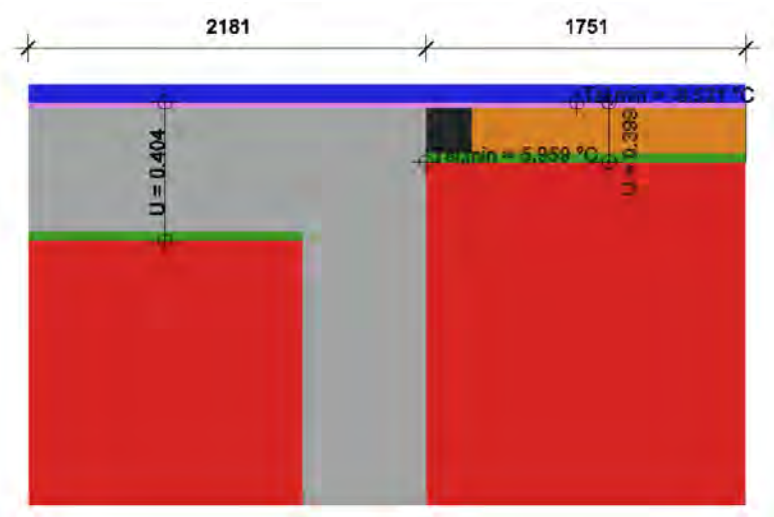
Tablica 24- Rubni uvjeti za detalj H3 u CRORAL-u

Legenda	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	ADIABATIC	-1	0	0

8.3.1. Prvi slučaj



Slika 54. Temperaturni profil detalja H3 (prvi slučaj)



Slika 55. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (prvi slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $5,959\text{ }^{\circ}\text{C}$, što je niže od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(5,959 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,5320$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 53,20% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,5320 je manji od sigurne granice 0,7.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

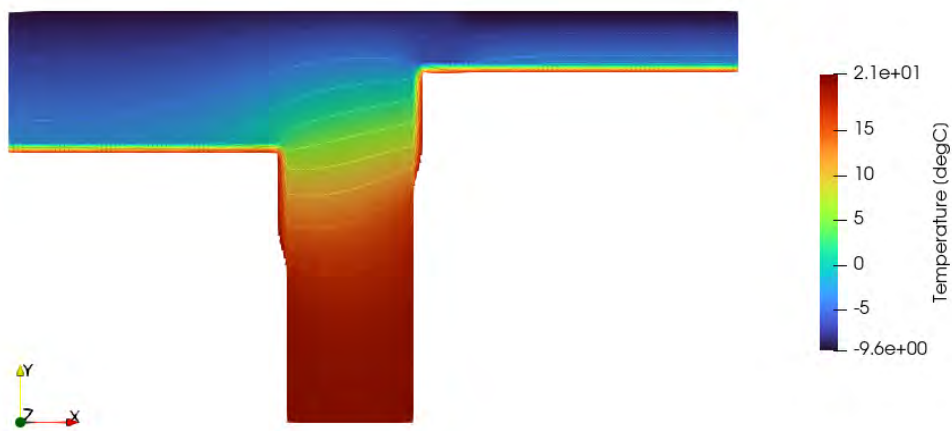
Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 2,710 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid,1} = 0,404 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid,2} = 2,181 \text{ m}$
- $U_{zid,1} = 0,399 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

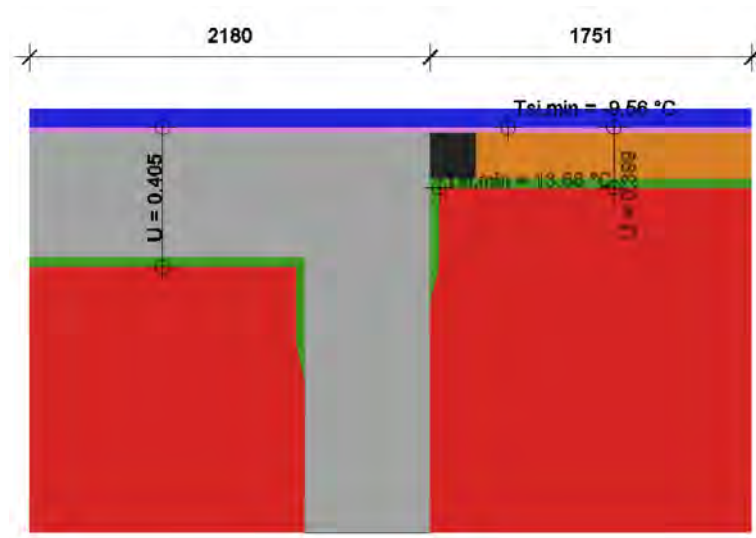
$$L_{zid,2} = 1,751 \Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 2,710 - 0,404 \cdot 2,181 - 0,399 \cdot 1,751 = 1,131 \text{ W/(mK)}$$

8.3.2. Drugi slučaj



Slika 56. Temperaturni profil detalja H3 (drugi slučaj)



Slika 57. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (drugi slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $13,66^{\circ}\text{C}$, što je više od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(13,66 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,7887$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 78,87% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,7887 je veći od sigurne granice 0,7, što znači kako nema rizika pojave kondenzacije.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

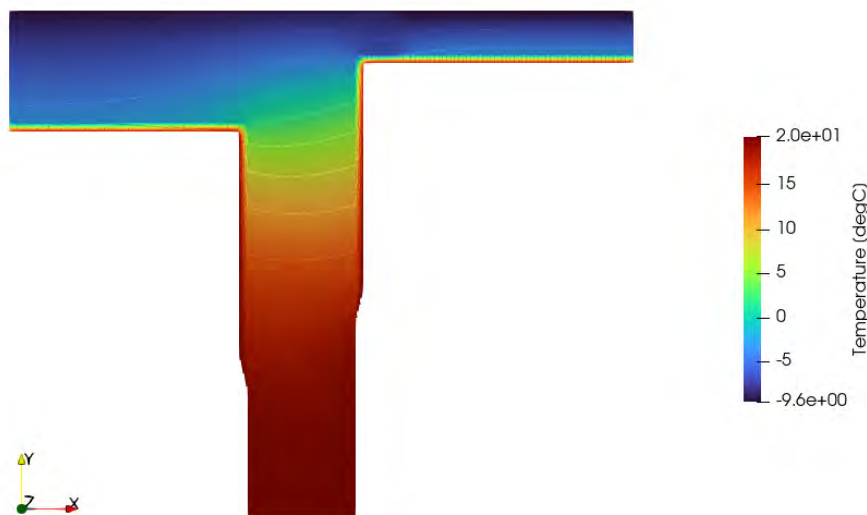
Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 2,154 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid,1} = 0,405 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid,2} = 2,180 \text{ m}$
- $U_{zid,1} = 0,399 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

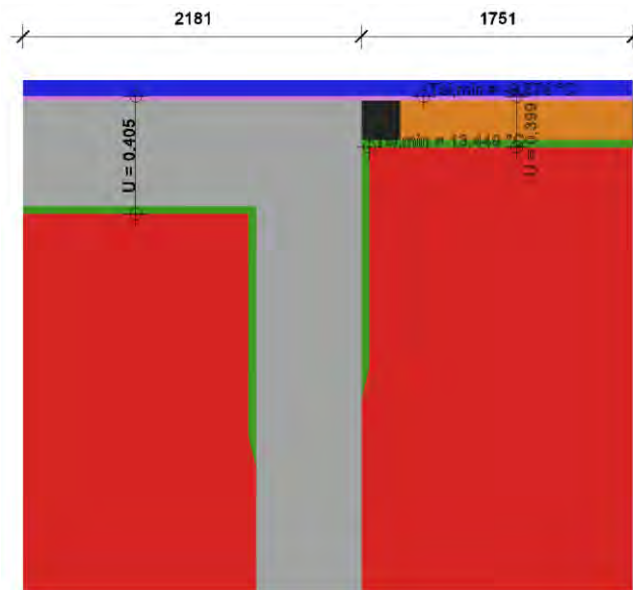
$$L_{zid,2} = 1,751 \Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 2,154 - 0,405 \cdot 2,180 - 0,399 \cdot 1,751 = 0,572 \text{ W/(mK)}$$

8.3.3. Treći slučaj



Slika 58. Temperaturni profil detalja H3 (treći slučaj)



Slika 59. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (treći slučaj)

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $13,449^{\circ}\text{C}$, što je više od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(13,449 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,7816$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 78,16% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,7816 je veći od sigurne granice 0,7, što znači kako nema rizika pojave kondenzacije.

Uočava se veća vrijednost f_{Rsi} za drugi slučaj što implicira kako je unutarnje zidove dovoljno izolirati 0,5 m od spoja s vanjskim zidom kako ne bi došlo do problema s kondenzacijom na promatranoj poziciji i sličnim pozicijama, analogno detalju H2.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 1,987 \text{ W}/(\text{mK})$
- $U_{zid,1} = 0,405 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- $L_{zid,2} = 2,181 \text{ m}$
- $U_{zid,1} = 0,399 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$$L_{zid,2} = 1,751 \Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,987 - 0,405 \cdot 2,181 - 0,399 \cdot 1,751 = 0,405 \text{ W}/(\text{mK})$$

8.4. Detalj V1

Detalj V1 predstavlja vertikalni spoj podne ploče na tlu i parapeta od nosivog kamenog zida.



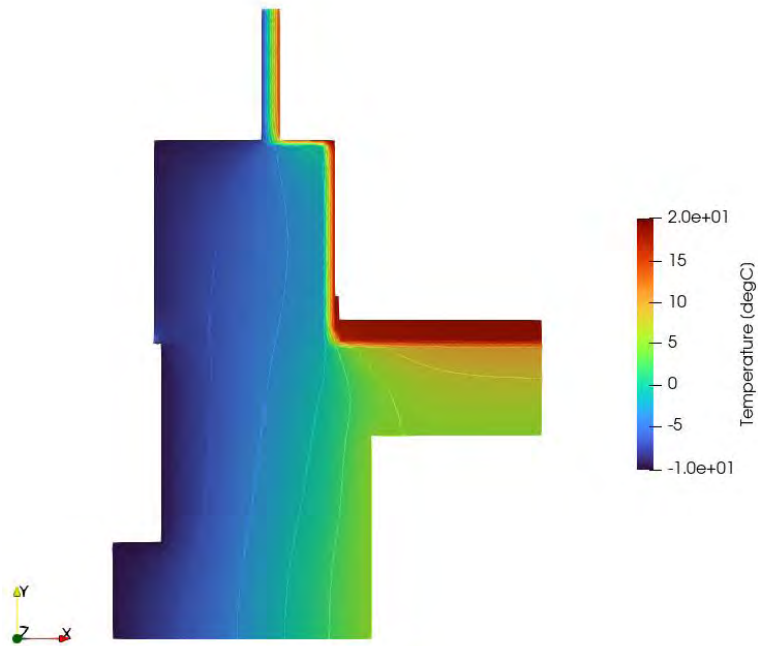
Slika 60. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V1 u CRORAL-u

Tablica 25. Slojevi za detalj V1 u CRORAL-u

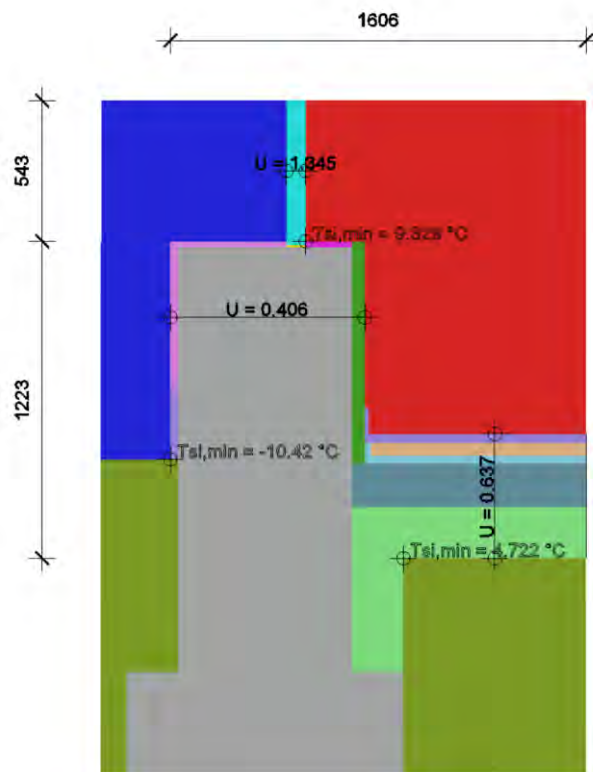
Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
1	AEROGEL	0,028	220	1000	5
2	BETON	0,490	1000	1000	68
3	CEMENTNI ESTRIH	1,600	2000	1030	50
4	EPS	0,037	21	1260	60
5	KAMEN	1,400	2000	1000	50
6	KAMENE PLOČE	2,800	2500	1000	170
7	PROZOR	0,130	1	1	100000
8	PUR PJENA	0,023	25	1400	60
9	ŠLJUNAK	0,810	1700	100	3
10	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20
11	XPS	0,033	28	1450	80

Tablica 26. Rubni uvjeti za detalj V3 u CRORAL-u

Legenda	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	TLO 1	9999999999	-10	90
4	TLO 2	9999999999	5	90
5	ADIABATIC	-1	0	0



Slika 61. Temperaturni profil za detalj V1



Slika 62. Detalj V1 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $9,329^{\circ}\text{C}$, što je niže od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Molliеровom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(9,329 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,6443$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 64,43% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,6443 je manji od sigurne granice 0,7.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline za granicu grijano – vani temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 1,121 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid} = 0,406 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid} = 1,223 \text{ m}$
- $U_{prozor} = 1,345 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$$L_{prozor} = 0,543 \text{ m } \Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,121 - 0,406 \cdot 1,223 - 1,345 \cdot 0,543 = -0,106 \text{ W/(mK)}$$

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline za granicu grijano – tlo temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 0,525 \text{ W/(mK)}$
- $U_{pod} = 0,637 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{pod} = 1,606 \text{ m}$

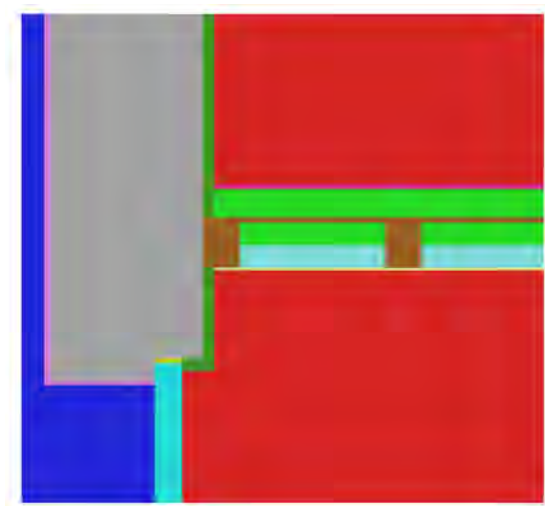
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 0,525 - 0,637 \cdot 1,606 = -0,498 \text{ W/(mK)}$$

$$\Sigma\Psi = -0,106 - 0,498 = -0,604$$

8.5. Detalj V2

Detalj V2 prikazuje vertikalni spoj kamenog zida i međukatne konstrukcije na granici grijano-grijano.



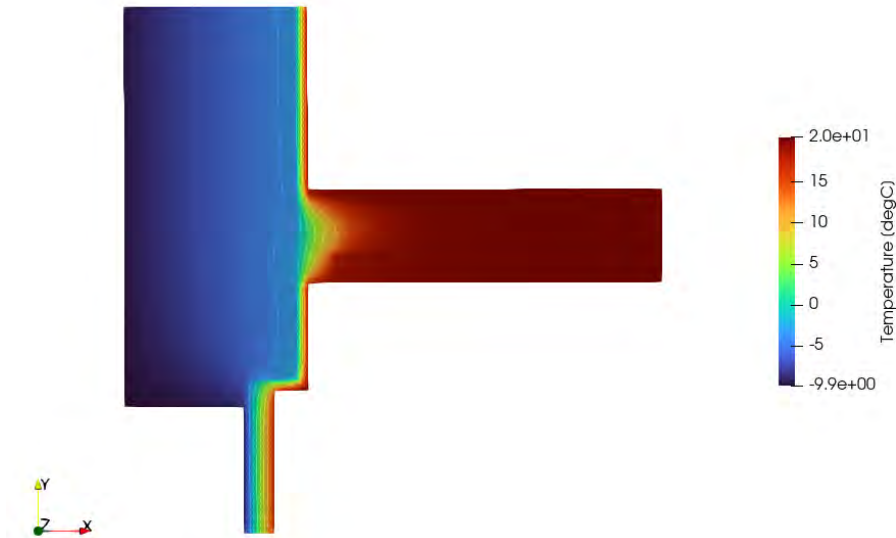
Slika 63. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V2 u CRORAL-u

Tablica 27. Slojevi za detalj V2 u CRORAL-u

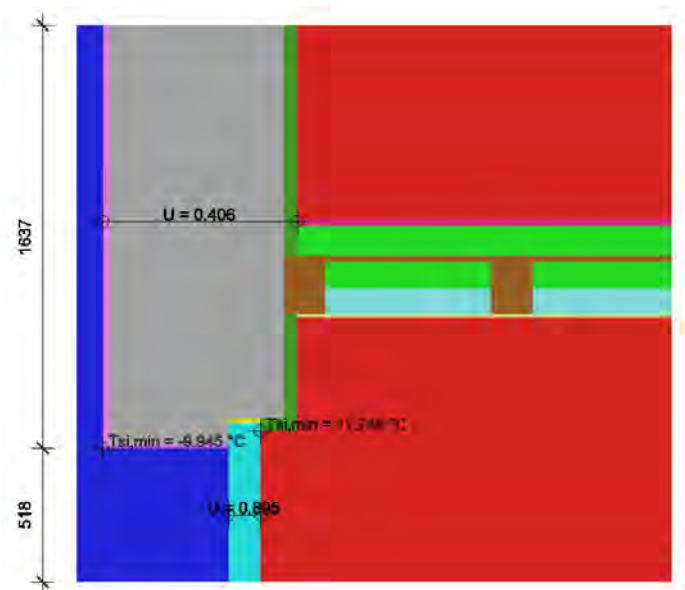
Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
1	AEROGEL	0,028	220	1000	5
2	DRVO	0,130	500	1600	50
3	GK PLOČA	0,250	900	900	4
4	KAMEN	1,400	2000	1000	50
5	MINERALNA VUNA	0,034	25	1030	1
6	PROZOR	0,130	1	1	100000
7	PUR PJENA	0,023	25	1400	60
8	SUHI ESTRIH	0,230	800	960	4
9	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20
10	ZRAK	2,085	1	1	1

Tablica 28. Rubni uvjeti za detalj V2 u CRORAL-u

Legenda	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	ADIABATIC	-1	0	0



Slika 64. Temperaturni profil detalja V2



Slika 65. Detalj V2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature

Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $11,746^{\circ}\text{C}$, što je niže od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Mollierovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(11,746 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,7249$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 72,49% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,7249 je veći od sigurne granice 0,7, pa prema ovoj metodi neće doći do pojave kondenzacije.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

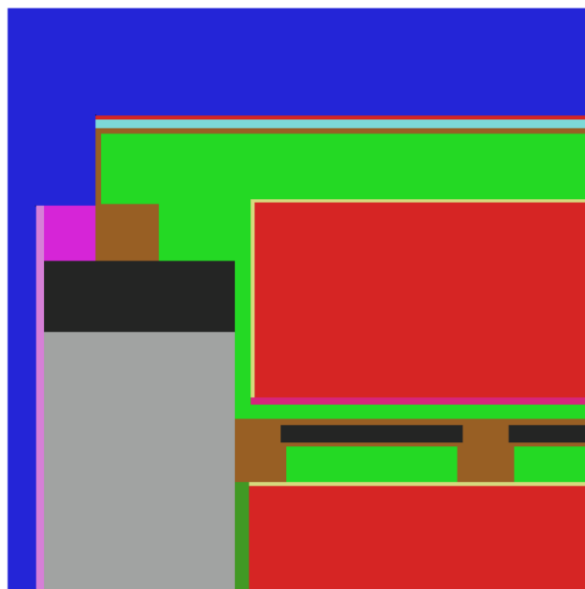
- $L_{2D} = 1,229 \text{ W/(mK)}$
- $U_{zid} = 0,406 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- $L_{zid} = 1,637 \text{ m}$
- $U_{prozor} = 0,895 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$$L_{prozor} = 0,518 \text{ m}\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 1,229 - 0,406 \cdot 1,637 - 0,895 \cdot 0,518 = 0,101 \text{ W/(mK)}$$

8.6. Detalj V3

Detalj V3 prikazuje vertikalni spoj krova, vanjskog kamenog zida i međukatne konstrukcije na granici grijano – negrijano. Zbog ograničenja programskog paketa „CRORAL“, krov je modeliran bez odgovarajućeg nagiba.



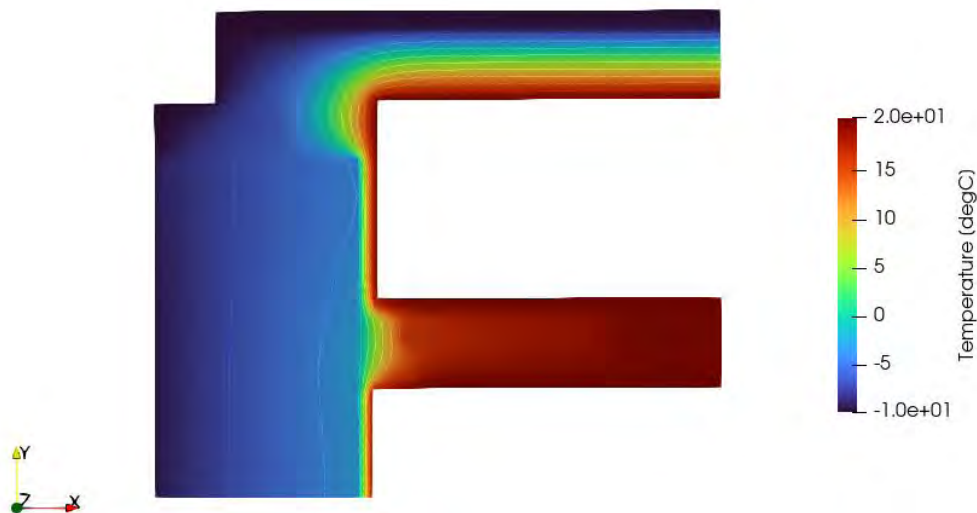
Slika 66. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V3 u CRORAL-u

Tablica 29. Slojevi za detalj V3 u CRORAL-u

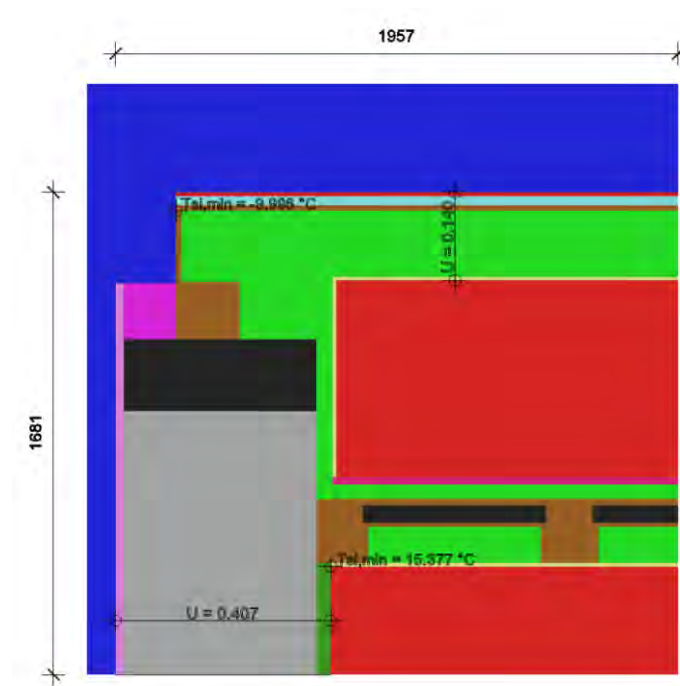
Legenda	Materijal	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	cp [J/(kgK)]	μ [-]
1	AB	2,600	2500	1000	110
2	AEROGEL	0,028	220	1000	5
3	CRIJEP	1,000	2000	900	40
4	DRVO	0,130	500	1600	50
5	GK PLOČA	0,250	900	900	4
6	KAMEN	1,400	2000	1000	50
7	MINERALNA VUNA	0,034	25	1030	1
8	SUHI ESTRIH	0,230	800	960	4
9	VAPNENO-CEMENTNA ŽBUKA	1,000	1800	1000	20
10	XPS	0,033	28	1450	80
11	ZRAK	6,450	1	1	1

Tablica 30. Rubni uvjeti za detalj V3 u CRORAL-u

Legenda	Rubni uvjet	h [W/(m ² K)]	T [°C]	RH [%]
1	INTERIJER	7,69	20	60
2	EKSTERIJER	25	-10	90
3	ADIABATIC	-1	0	0



Slika 67. Temperaturni profil detalja V3



Slika 68. Detalj V3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenta prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature. Minimalna temperatura na unutarnjoj površini iznosi $15,377^{\circ}\text{C}$, što je više od temperature rosišta za dane rubne uvijete prema Molliarovom dijagramu.

Vjerojatnost kondenzacije prikazana preko faktora f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{(15,377 - (-10))}{(20 - (-10))} = 0,8459$$

Dobivena vrijednost faktora rizika za stvaranje kondenzacije znači kako je unutarnja površinska temperatura 84,59% iznad temperaturne razlike između unutarnje i vanjske temperature. Faktor rizika za stvaranje kondenzacije 0,8459 je veći od sigurne granice 0,7, što znači kako nema rizika pojave kondenzacije.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline temeljen na izlaznim podacima:

Izlazni podaci:

- $L_{2D} = 0,750 \text{ W}/(\text{mK})$
- $U_{zid} = 0,407 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- $L_{zid,1} = 1,681 \text{ m}$
- $U_{krov} = 0,140 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$$L_{krov} = 1,957 \Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot L_j$$

$$\Psi = 0,750 - 0,407 \cdot 1,681 - 0,140 \cdot 1,957 = -0,208 \text{ W}/(\text{mK})$$

9. UTJECAJ VLAGE

Vlaga predstavlja veliku prijetnju kvaliteti konstrukcije te kvaliteti boravka ljudi u korisnom prostoru konstrukcije, stoga je nužno dobro poznavati i razumijevati njeno kretanje i zadržavanje u građevinskim materijalima. Dugotrajna vlaga može dovesti do pojave gljivica i plijesni, korozije kod metala, bubrenja i truleži kod drvenih komponenti, oštećenja boja i lakova, kod betona i cigli može doći do taloženja soli na površini itd. Uz sve navedene degradacije dugotrajna vlaga uzrokuje i smanjenje toplinsko-izolacijske moći građevinskih elemenata što također utječe na kvalitetu boravka u unutarnjim prostorijama. Studije pokazuju kako je u 70% slučajeva, direktni ili indirektni krivac za probleme u zgradama, upravo vlaga. [41]

Transport zraka, vlage, odnosno vode i vodene pare kroz građevne elemente uzrokovan je razlikom parcijalnih tlakova odnosno razlikom temperatura unutarnjeg i vanjskog prostora. Što je gradijent razlike veći, to je veća i brzina transporta, a odvija se do trenutka uspostave ravnoteže. Predmetni transport tvari kroz vanjsku ovojnici naziva se higrotermalnim ponašanjem ovojnice. Krucijalan je za ispunjavanje temeljnih zahtjeva za građevinu, funkcionalnosti i udobnosti.

Maksimalna količina vodene pare u zraku ovisna je o temperaturi zraka. Padom temperature zraka pri konstantnoj količini vodene pare, odnosno porastom vlage u uvjetima konstantne temperature, raste relativna vlažnost zraka. Stanje kada masa vodene pare dosegne maksimalnu vrijednost za određenu temperaturu zraka, naziva se točka rosišta. Posljedica je pretvaranje pare u tekućinu, odnosno pojava kondenzacije. Transport vodene pare kroz građevne elemente se odvija putem difuzije i gibanja zraka i nije opasan do pojave kondenzacije unutar elementa. Pojava kondenzacije s druge strane uzrokuje:

- Hladne unutarnje površine
- Degradaciju materijala (ljuštenje betona, bubrenje parketa i drvenih greda itd.)
- Ljuštenje žbuke
- Neugodan miris vlage
- Smanjenje toplinsko – izolacijskih svojstava materijala
- Potencijalnu pojavu gljivica i plijesni.

Vodeći problem zgrade Zavičajnog muzeja Biograd na Moru upravo je vlaga čemu je posvećena posebna pažnja na sljedećim stranicama.

Kako se predmetna zgrada nalazi u kulturno-povijesnoj cjelini grada, u skladu s konzervatorskim preporukama, energetskej obnovi pristupilo se korištenjem suvremenih

materijala koji zauzimaju minimalno korisne površine zgrade, te je promijenjena stara stolarija koja je propuštala znatnu količinu vanjskoga zraka infiltracijom. Međutim, zbog provedenih zahvata, vlaga ostaje "zarobljena" u prostoriji te je nužno uvođenje mehaničke ventilacije i kontrolirano provjetravanje. Kada relativna vlažnost zraka više od 50% vremena prelazi 50%, stvaraju se uvjeti za razvoj ličinki, a povećanjem na 70%, pojavljuju se gljivice i plijesan. Osim visoke vlažnosti problem se može razviti i zbog premale vlažnosti u prostoriji što rezultira suhoćom kože, grla i nosa te povećava alergijske reakcije. Osim zdravstvenih tegoba i smanjene ugodnosti boravka, neprikladna vlažnost uzrokuje degradaciju materijala što dovodi do narušavanja izgleda zidova, stropova i ostalih građevnih elemenata te u dužem periodu može narušiti trajnost i dovesti u pitanje stabilnost same konstrukcije.

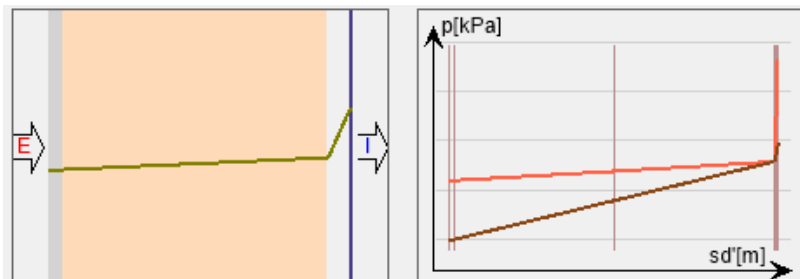
Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama propisuje osiguravanje stacionarnog toka vodene pare kroz konstrukciju, tj. ispravan fizikalni proces koji dopušta minimalno stvaranje kondenzata koji neće oštetiti građevinu, a može se isušiti za vrijeme ljetnih mjeseci (prema Glaserovoj metodi). [30]

9.1. Proračun difuzije vodene pare

Difuzija vodene pare je fizikalni proces transporta vodene pare s područja veće koncentracije u područje s manjom koncentracijom kroz materijale i građevne dijelove zgrade. Dva su temeljna pristupa proračunu difuzije vodene pare. Razlikujemo stacionarnu metodu proračuna, prema Glaseru te nestacionarne metode proračuna koje se provode na numeričkim higrotermalnim modelima (HAM).

Proračun difuzije vodene pare u računalnom paketu "KI Expert Plus" [42] temelji se na široko korištenoj Glaserovoj metodi i sadrži određene manjkavosti. Prema spomenutoj, relativno jednostavnoj, grafičko – analitičkoj metodi koja se temelji na Fickovom zakonu [43], transport topline i vlage su međusobno neovisni, a vanjski i unutarnji uvjeti su stacionarni. Ne postoji sorpcija vlage u materijalu i migracija tekuće vode unutar zida. Transportna svojstva građevinskih materijala su konstantna. Ne uzima se u obzir ugrađena vlaga niti poroznost građevinskih materijala, a tekućina unutar zida javlja se zbog kondenzacije vodene pare. Kako bi se Glaserovom metodom ustanovilo dolazi li unutar građevnog dijela zgrade do kondenzacije vodene pare koja se difuzijom kreće kroz građevni dio, potrebno je grafički, kroz poprečni presjek građevnog dijela, ucrtati krivulju parcijalnog tlaka vodene pare i krivulju tlaka zasićenja. U svakom sloju promatranog građevnog dijela, vrijednost tlaka zasićenja mora biti veća od vrijednosti parcijalnog tlaka. Ukoliko su te dvije vrijednosti jednake (krivulje u grafičkom prikazu se sijeku), dolazi do pojave kondenzacije.

Prema Glaserovoj metodi, u zimskim mjesecima (siječanj, veljača, ožujak i prosinac) do kondenzacije u zidovima dolazi u sloju hidrauličnog vapnenog šprica, na spoju kamena i toplinske izolacije (Slika 69).



Slika 69. Kondenzacija u zidu prema Glaserovoj metodi

Krov je promatran u dva presjeka, kroz drveni rog te između rogova (kroz izolaciju). Prema spomenutoj metodi, u krovu neće doći do kondenzacije.

Za razliku od stacionarne Glaserove metode, numerički higrotermalni modeli omogućuju dinamički proračun, uzimaju u obzir sve mehanizme prijenosa topline, zraka i vlage, te međusobni utjecaj istih. Temelje se na izračunu kombiniranog utjecaja topline, zraka i vlage, a uključuju interakcije raznih građevnih materijala, zraka u prostoriji te utjecaja korisnika i sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije.

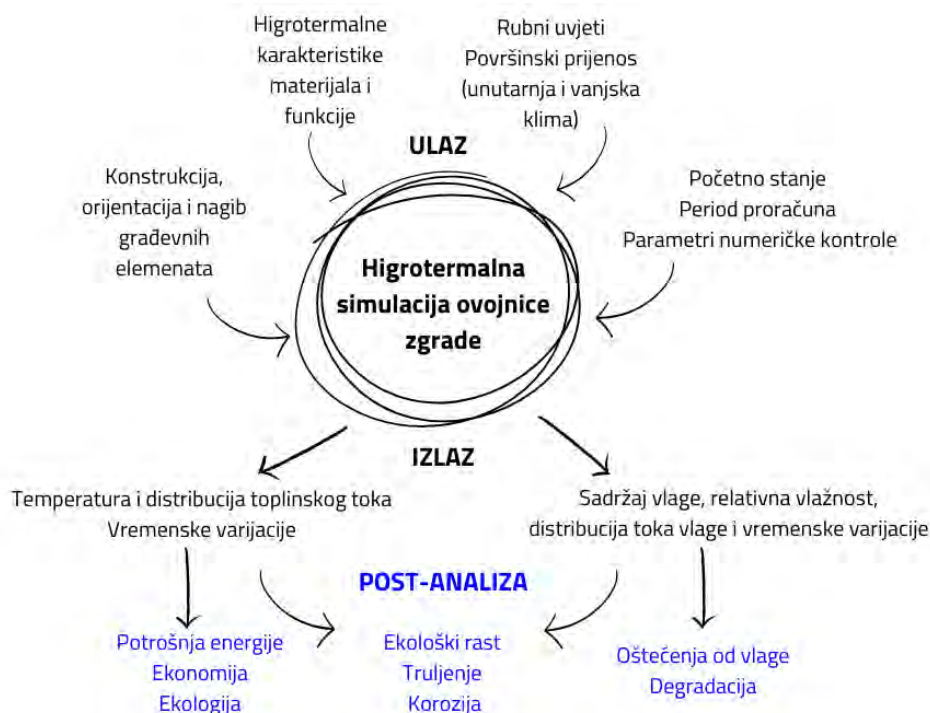
Ulazni parametri simulacijskih HAM modela su [44]:

- 1) orijentacija i nagib konstrukcijskih elemenata,
- 2) higrotermalni parametri materijala,
- 3) granične vrijednosti površinskog prijenosa topline, zraka i vlage između vanjskog i unutarnjeg prostora,
- 4) rubni uvjeti,
- 5) vremenski period proračuna,
- 6) numerički parametri za kontrolu.

Izlazni parametri modela su [44]:

- 1) temperatura i distribucija toplinskog toka te njihove varijacije u vremenu,
- 2) sadržaj vlage te relativna vlažnost i distribucija toka vlage u vremenu.

Osim navedenih izlaznih parametara HAM modeli omogućuju određivanje rizika pojave plijesni na vanjskim i unutrašnjim površinama te utjecaj kiše na pojavu i intenzitet odvodnje vode s ciglenih fasada te, ovisno o svojstvima pojedinih softvera, i druge karakteristike.



Slika 70. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice zgrade [44]

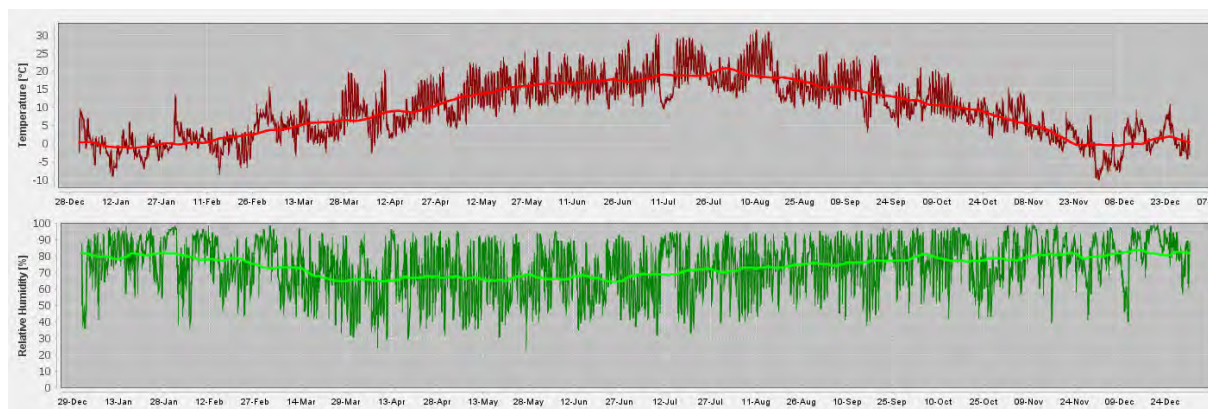
Iako složenija metoda od Glaserove, nudi pouzdane troškovno i vremenski optimalne analize u usporedbi s eksperimentalnim ispitivanjima.

Zbog ranije navedenih nedostataka Glaserove metode, proveden je dodatni proračun difuzije vodene pare analizom HAM modela u računalnom paketu WUFI® Light 6.3.2. Riječ je o besplatnoj inačici programa WUFI® Pro [45] za koju se vežu određena ograničenja prilikom unosa ulaznih parametara. Spomenuta ograničenja navode se u nastavku.

Proračun difuzije vodene pare proveden je za vanjske zidove, sa sve četiri strane svijeta, te za krov kroz dva presjeka (kroz drveni rog, te između drvenih rogova).

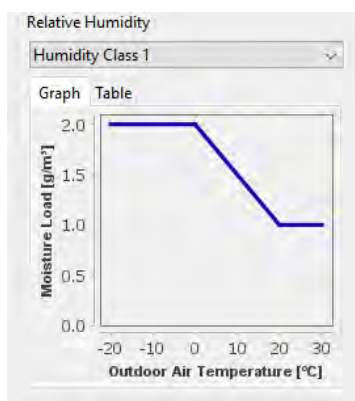
Zgrada je lokacijski smještena u Innsbruck umjesto u Biograd na Moru, što je opravdano jer je od ponuđenih klimatskih lokacija najbližnja i geografski najbliža stvarnoj lokaciji. Zbog nepovoljnijih klimatskih uvjeta u Innsbrucku, priloženi rezultati su "na strani sigurnosti". Procijenjena vlaga u elementima je ravnomjerna, 80%, što je više od vjerojatne ugradbene količine vlage u materijalima, a temperatura je 20°C.

Na slici niže prikazani su dijagrami raspodjele temperature i vlažnosti u Innsbrucku. Tanke linije prikazuju satnu raspodjelu, a deblje mjesečnu raspodjelu.



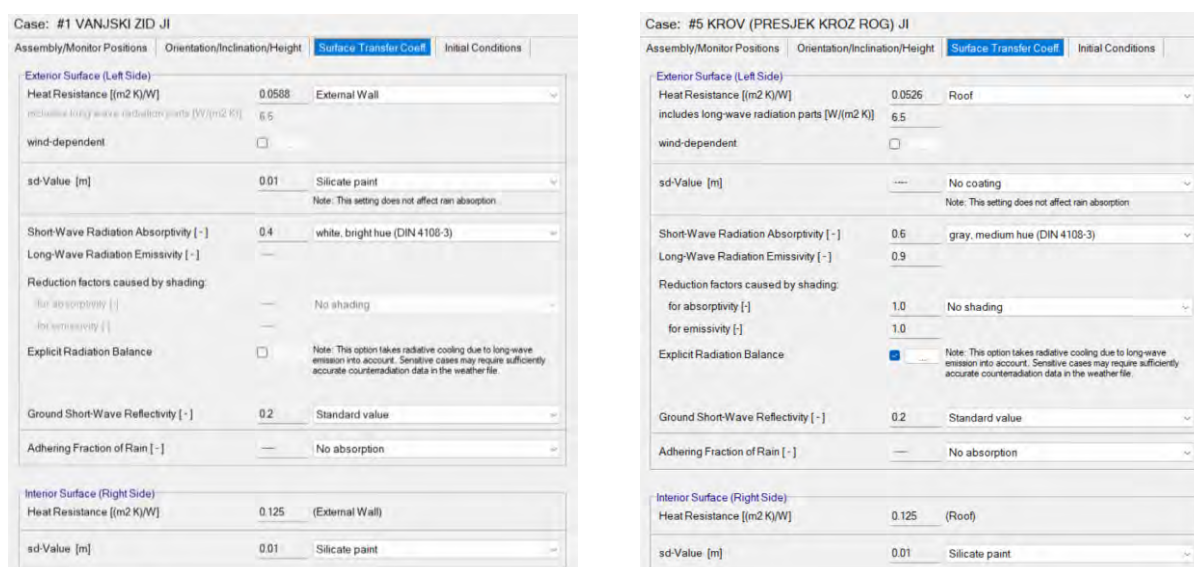
Slika 71. Klimatski uvjeti u Innsbrucku (WUFI Light)

Unutarnja klima uzima se u obzir prema EN ISO 13788. Ista izračunava unutarnju vlažnost zraka na temelju vanjske vlažnosti zraka, uz dodatno opterećenje vlagom koje ovisi o vanjskoj temperaturi. Unutarnja temperatura može se postaviti kao konstantna tijekom cijele godine, a norma propisuje vrijednost od 20 °C. Opterećenja vlagom su konstantna pri vanjskim temperaturama ispod 0 °C. Vrijednosti za pet klasa vlažnosti povećavaju se u koracima od 2 g/m³, počevši od 2 g/m³ za „klasnu vlažnosti 1“ do 10 g/m³ za „klasnu vlažnosti 5“. Pri vanjskim temperaturama zraka iznad 20 °C pretpostavlja se visoka izmjena zraka između unutarnjeg i vanjskog prostora, pa se ovdje pretpostavlja konstantno dodatno opterećenje vlagom od 1 g/m³ („za klasnu vlažnosti 5“: 2 g/m³). Između 0 °C i 20 °C, odgovarajuća opterećenja vlagom linearno se smanjuju na 1 g/m³ ili 2 g/m³. [46] Odabrana je „klasna vlažnosti 1“.



Slika 72. Klasa vlažnosti 1 (EN ISO 13788)

U korištenoj inačici programskog paketa nije dostupno definiranje novih građevinskih materijala te je bilo nužno odabrati materijale iz postojećeg kataloga. Odabrani su materijali čija su fizikalna svojstva najbližnja projektiranim materijalima. Zbog ograničenja je odabran najnepovoljniji nagib i orijentacija, "na strani sigurnosti". Opterećenje kišom je definirano obzirom na položaj elemenata i visinu zgrade. Definirane su također završne obrade s unutarnje i vanjske strane. Boja sloja završne obrade izložene atmosferskim utjecajima određuje razinu apsorpcije kratkovalnog zračenja i emisije dugovalnog zračenja. Eksplicitnu ravnotežu zračenja bilo je potrebno uključiti kod proračuna krova dok za zid nije uključena. Za koeficijente prizemne dugovalne emisije i refleksije, kao i indeks oblačnosti su uzete prosječne vrijednosti s obzirom na klimatsko područje. Za refleksiju kratkovalnog zračenja ostavljena također standardna vrijednost.



Slika 73. Svojstva unutarnjih i vanjskih površina promatranih elemenata (zid lijevo, krov desno)

Proračun za zid je proveden za razdoblje od pet godina što je optimalan period proračuna za uvid u higrotermalno ponašanje ovojnice i periodično stanje ciklusa vlaženja i isušivanja tijekom godišnjih doba, a proračun za krov za razdoblje od deset godina. „Osjetljiviji“ zid je naknadno također proračunat na deset godina kako bi postizanje dinamičke ravnoteže bilo očigledno.

Razdoblje za koje se proračun provodi ovisi o specifičnostima građevinskih elemenata, njihovim funkcijama, te o načinu na koji su izloženi različitim vremenskim uvjetima. Zidovi su obično manje izloženi ekstremnim vremenskim uvjetima u usporedbi s krovovima. Oni su više zaštićeni od direktnih utjecaja kiše, snijega i UV zračenja, jer su često zaštićeni

fasadama ili drugim vanjskim slojevima. Krovovi su direktno izloženi vremenskim uvjetima, uključujući kišu, snijeg, sunce i vjetar. Zbog toga je krov podložniji promjenama u razinama vlage i većem riziku od kondenzacije. Kondenzacija na krovovima može dovesti do ozbiljnih problema, poput prokišnjavanja, oštećenja strukture i pojave plijesni. Zato se proračun difuzije provodi za dulje razdoblje kako bi se osiguralo da krov može izdržati ove uvjete tijekom dužeg vremenskog perioda.

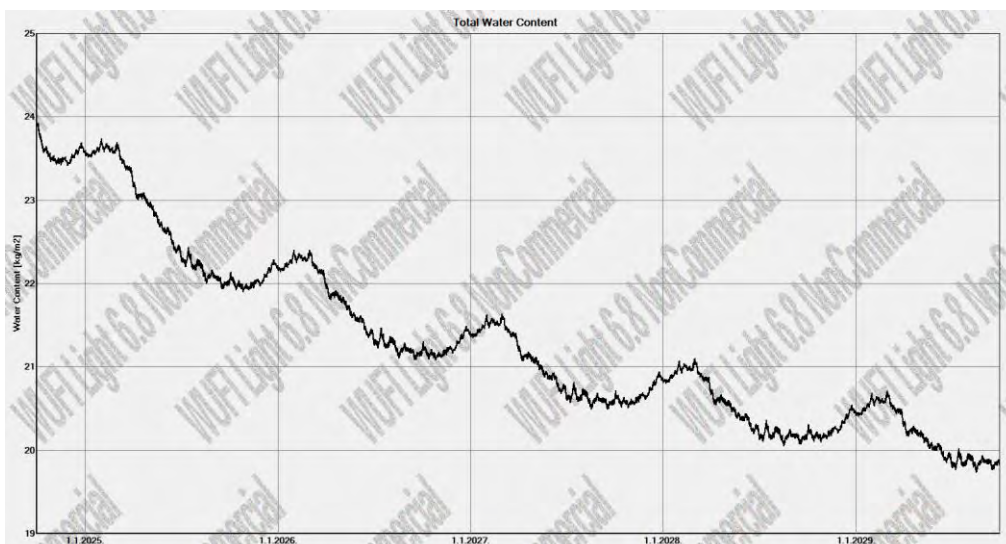
Izabran je najmanji mogući vremenski korak, 1 sat, čime se postiže visoka preciznost proračuna.

WUFI® se temelji na iterativnoj metodi rješavanja niza parcijalnih diferencijalnih jednadžbi pomoću početnih i rubnih uvjeta. Kada je konvergencija izuzetno spora i dosegne maksimalan broj iteracija bez rješenja koje ispunjava kriterij za prestanak, iteracija se zaustavlja, a program prihvaća rješenje bez obzira na kriterij uz povećanje broja grešaka konvergencije za jedan. Po završetku numeričkog proračuna, u izvješću je moguće vidjeti podatke o kvaliteti, odnosno stabilnosti provedenog proračuna. U slučaju stabilnog numeričkog proračuna, vrijednosti „Balance 1“ i „Balance 2“ trebaju biti što bliže. Proračun je u redu ukoliko se razlika pojavljuje tek na decimalama. U protivnom je proračun nestabilan te je potrebno detektirati i ukloniti izvor numeričkog problema. [46]

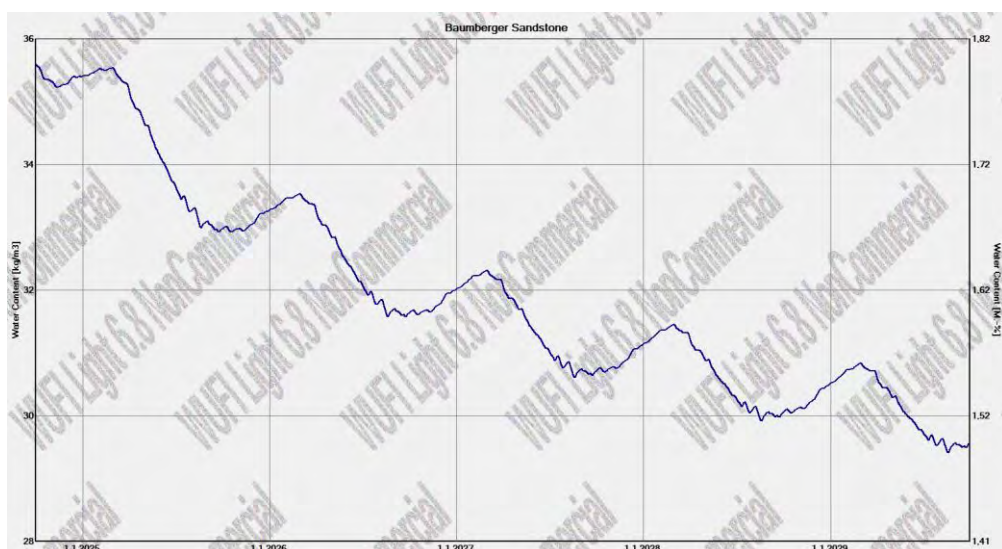
9.1.1. Rezultati proračuna zidova

Proračun je proveden za zidove sa sve četiri strane svijeta (jugoistok, jugozapad, sjeveroistok i sjeverozapad).

Prva procjena rezultata se temelji na ukupnom sadržaju vlage u elementu te njegovim komponentama. Pokazatelj je povećanja ili smanjenja vlage u komponenti tijekom ispitivanog razdoblja. Nakon početnog stanja ugrađene vlažnosti, ukupna razina vlage ima generalno konstantan pad s ciklusima rasta i pada zbog sušenja i vlaženja tijekom izmjene godišnjih doba za zidove sa sve četiri strane svijeta (JI, JZ, SI i SZ). Vidljivo je povoljno ponašanje elementa, odnosno ne dolazi do zaostajanja vlage u elementu. Ukupan sadržaj vlage prikazan je u slikama u nastavku.



Slika 74. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (jugoistok)

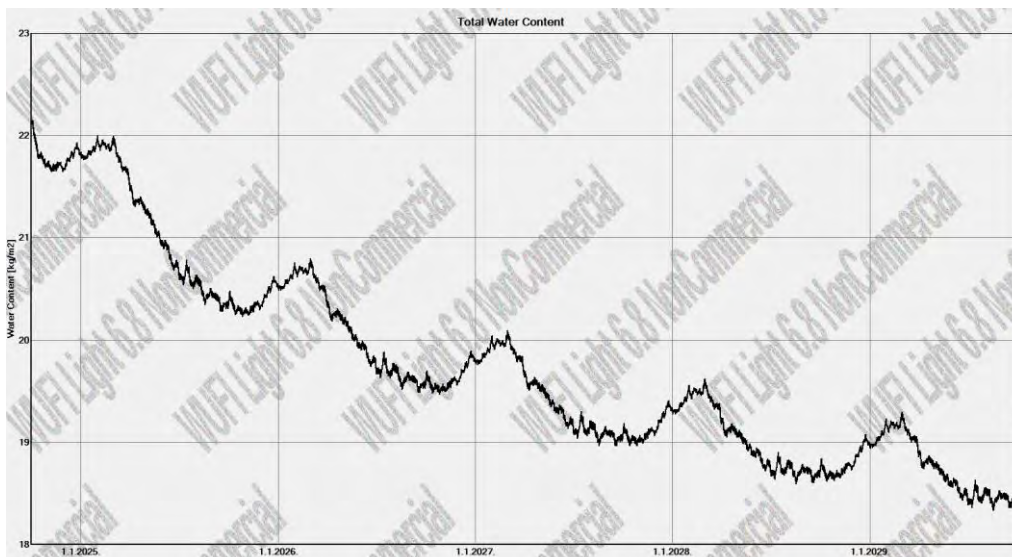


Slika 75. Ukupan sadržaj vlage u kamenu u vanjskom zidu (jugoistok)

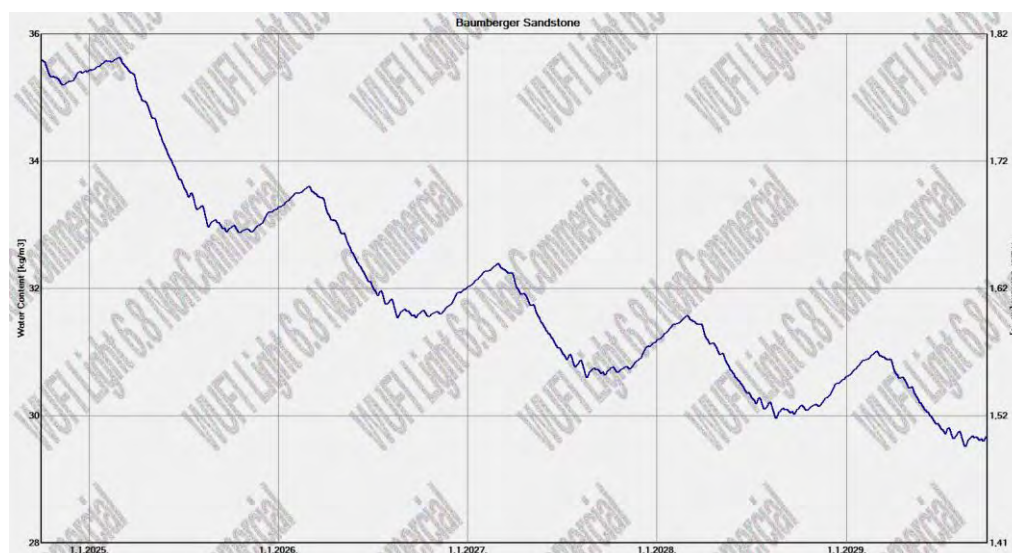
Water Content [kg/m²]				
	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	23,91	19,8	19,64	23,91

Water Content [kg/m³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m ³)	45,00	35,58	29,61	45,66
Baumberger Sandstone	35,60	29,57	29,41	35,60
Hydraulic Lime Mortar, fine	12,07	9,89	7,11	17,45
CERABRAN® AEROPUTZ	7,00	6,15	5,03	7,00
SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel lei	11,28	5,90	3,36	11,28
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,34	2,43	6,30

Slika 76. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na jugoistoku tijekom 5-godišnjeg razdoblja



Slika 77. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (jugozapad)

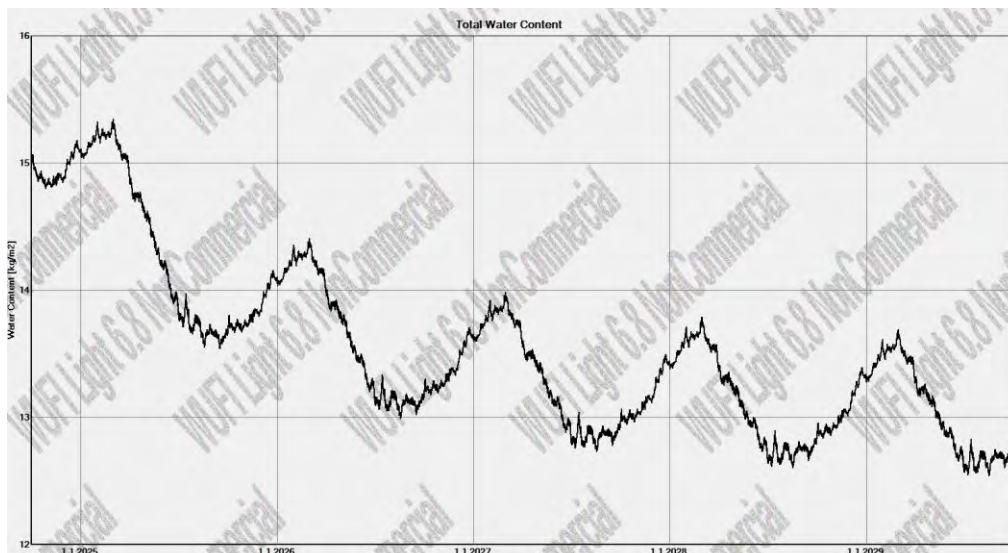


Slika 78. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (jugozapad)

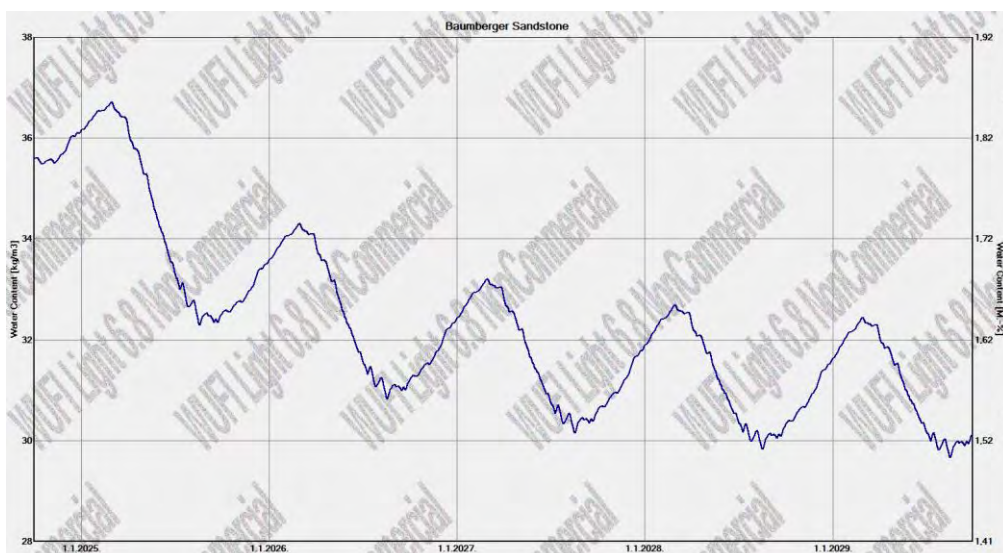
Water Content [kg/m2]				
	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	22,13	18,39	18,24	22,13

Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m	45,00	35,63	30,16	45,68
Baumberger Sandstone	35,60	29,68	29,51	35,63
Hydraulic Lime Mortar, fine	12,07	10,12	7,21	18,11
CERABRAN® AEROPUTZ	7,00	6,18	5,04	7,00
SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel lei	11,28	5,91	3,34	11,28
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,35	2,43	6,30

Slika 79. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na jugozapadu tijekom 5-godišnjeg razdoblja



Slika 80. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (sjeveroistok)

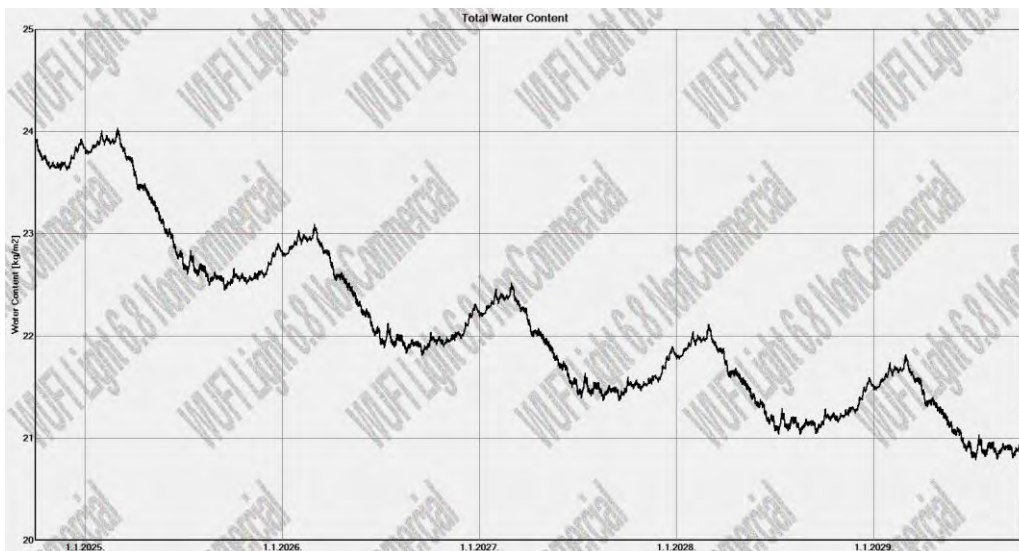


Slika 81. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (sjeveroistok)

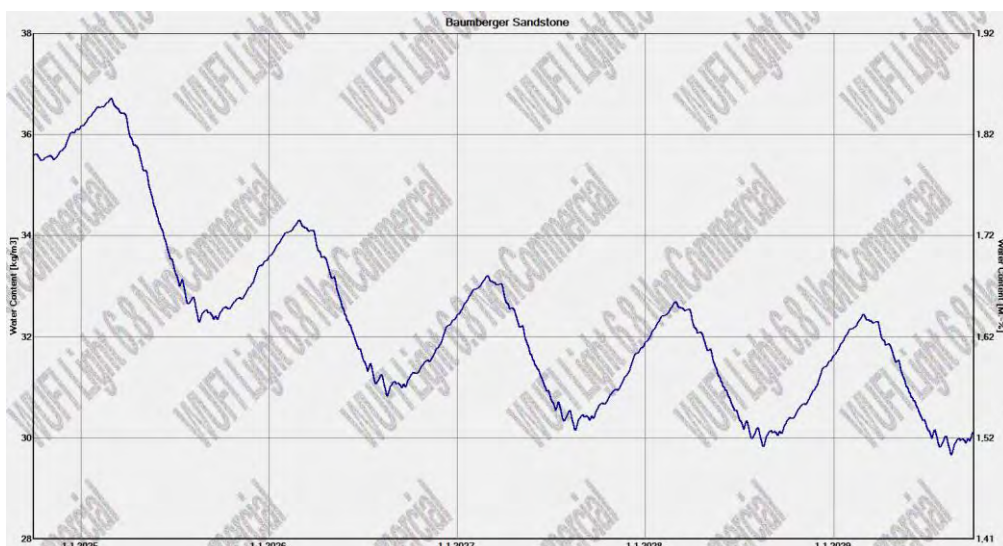
Water Content [kg/m ²]				
	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	15,01	12,71	12,46	15,33

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m ³)	45,00	38,12	30,82	46,36
Baumberger Sandstone	35,60	30,13	29,67	36,71
Hydraulic Lime Mortar, fine	12,07	11,43	7,32	23,85
CERABRAN® AEROPUTZ	7,00	6,29	5,18	7,00
SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel lei	11,28	5,93	3,30	11,28
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,37	2,44	6,30

Slika 82. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeveroistoku tijekom 5-godišnjeg razdoblja



Slika 83. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (sjeverozapad)



Slika 84. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (sjeverozapad)

Water Content [kg/m²]

	Start	End	Min.	Max.
Total Water Content	23,91	20,35	20,14	24,02

Water Content [kg/m³]

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m	45,00	38,02	31,32	46,41
Baumberger Sandstone	35,60	30,32	30,12	35,94
Hydraulic Lime Mortar, fine	12,07	11,03	7,78	19,07
CERABRAN® AEROPUTZ	7,00	6,24	5,11	7,00
SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel lei	11,28	5,91	3,35	11,28
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,36	2,44	6,30

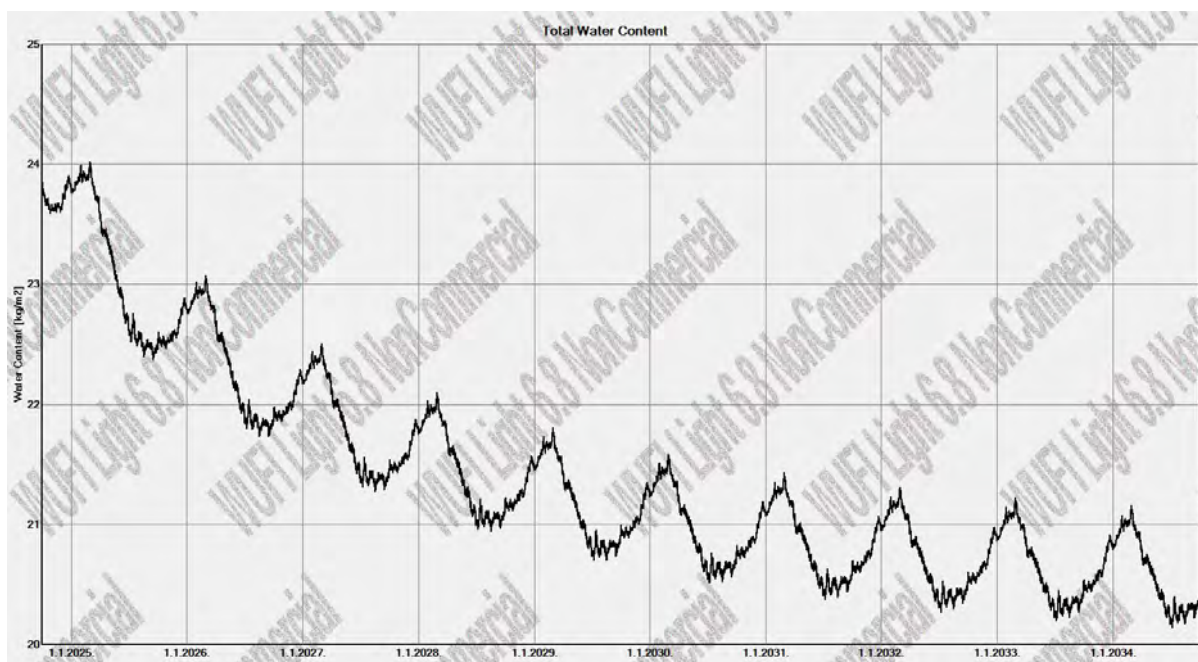
Slika 85. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeverozapadu tijekom 5-godišnjeg razdoblja

Analizom priloženih dijagrama zaključuje se kako niti u jednom sloju ne dolazi do nakupljanja vlage tijekom promatranog 5-godišnjeg razdoblja. Konstrukcija se suši.

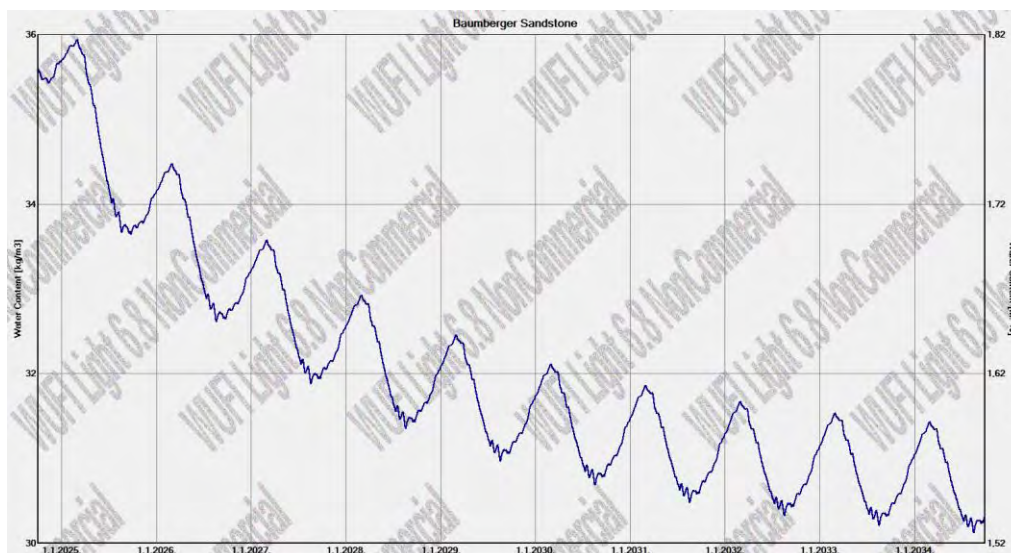
Konstruktivni dio vanjskog zida obično ima nižu temperaturu jer je izložen vanjskim klimatskim uvjetima. S druge strane, unutarnja toplinska izolacija zadržava toplinu unutar zgrade, stvarajući bitnu razliku u temperaturi između unutarnjih i vanjskih slojeva. Kada topao, vlažan zrak iz unutrašnjosti zgrade dođe u kontakt s hladnijim vanjskim zidom, dolazi do kondenzacije vodene pare na tom prijelaznom području. Stoga je s posebnom pažnjom promatran upravo hidraulični cementni špric koji se nalazi između kamenih zidova i unutarnje toplinske aerogel žbuke te kontaktna zona kamena i vapnenog šprica.

Zid na sjeverozapadu pohranjuje najveću količinu vlage u usporedbi s ostalim zidovima na kraju promatranog razdoblja, stoga će se u nastavku prikazati relevantni dijagrami za isti, ali za proračunsko razdoblje od 10 godina, obzirom da za promatrano razdoblje od 5 godina nije postignuta dinamička ravnoteža.

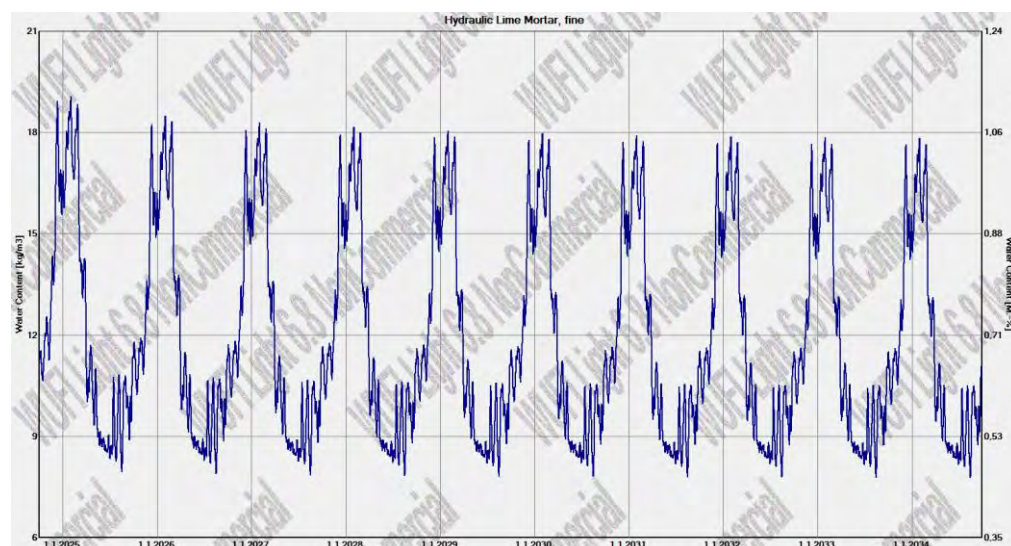
Nakon 6 godina, promjene sadržaja vlage u elementu i u kritičnom sloju kamena su minimalne, tj. element je gotovo dosegnuo stanje dinamičke ravnoteže.



Slika 86. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja



Slika 87. Ukupan sadržaj vlage u sloju kamena na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja

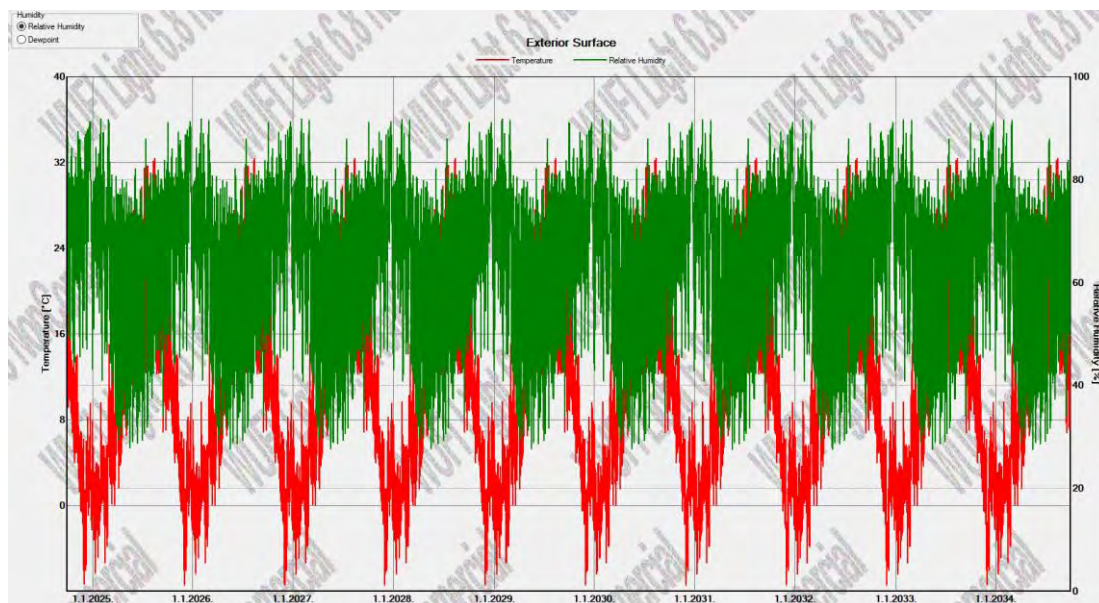


Slika 88. Ukupan sadržaj vode u hidrauličnom vapnenom špricu na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m ³)	45,00	38,02	31,32	46,41
Baumberger Sandstone	35,60	30,32	30,12	35,94
Hydraulic Lime Mortar, fine	12,07	11,03	7,78	19,07
CERABRAN® AEROPUTZ	7,00	6,24	5,11	7,00
SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel le	11,28	5,91	3,35	11,28
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,36	2,44	6,30

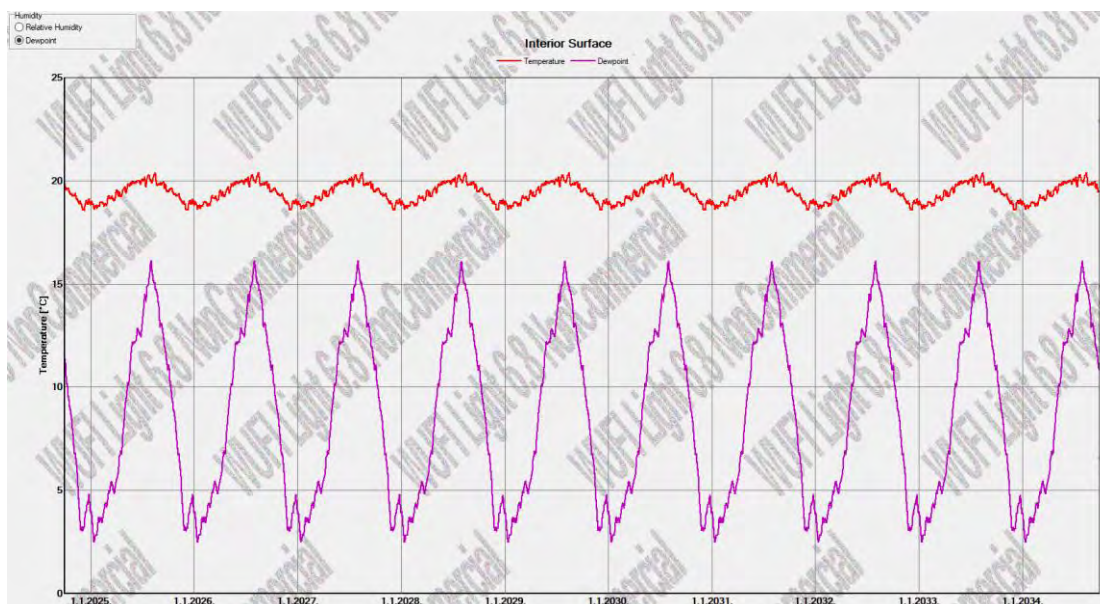
Slika 89. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja

Odnos relativne vlažnosti i temperature na vanjskoj površini elementa je obrnuto proporcionalan. Kada raste temperatura zraka, vrijednost relativne vlažnosti pada ukoliko nije došlo do povećanja vlage u zraku. Očekivani odnos prikazan je u nastavku.

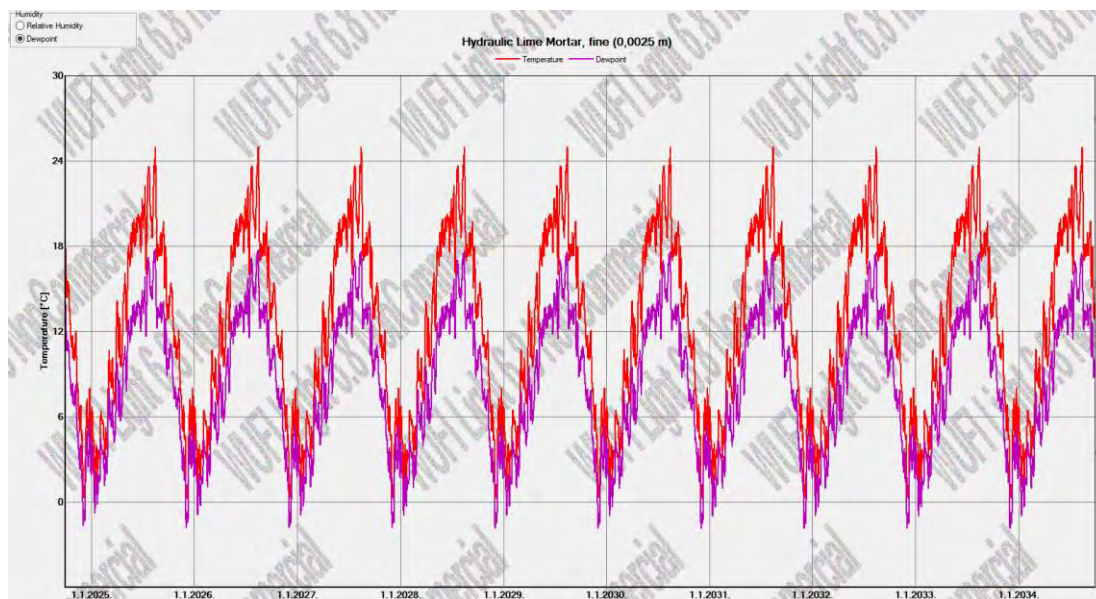


Slika 90. Odnos relativne vlažnosti (zeleno) i temperature tijekom vremena (crveno) za vanjsku površinu zida na sjeverozapadu

Iako neznatno u zimskim mjesecima, temperatura kritičnog sloja zida je uvijek viša od temperature rosišta, što ide u prilog rekonstrukciji slojeva zida. Zadovoljen je minimum potreban funkcioniranje na ovaj način projektiranog zida.



Slika 91. Odnos temperature unutarnje površine zida (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) tijekom vremena na sjeverozapadu



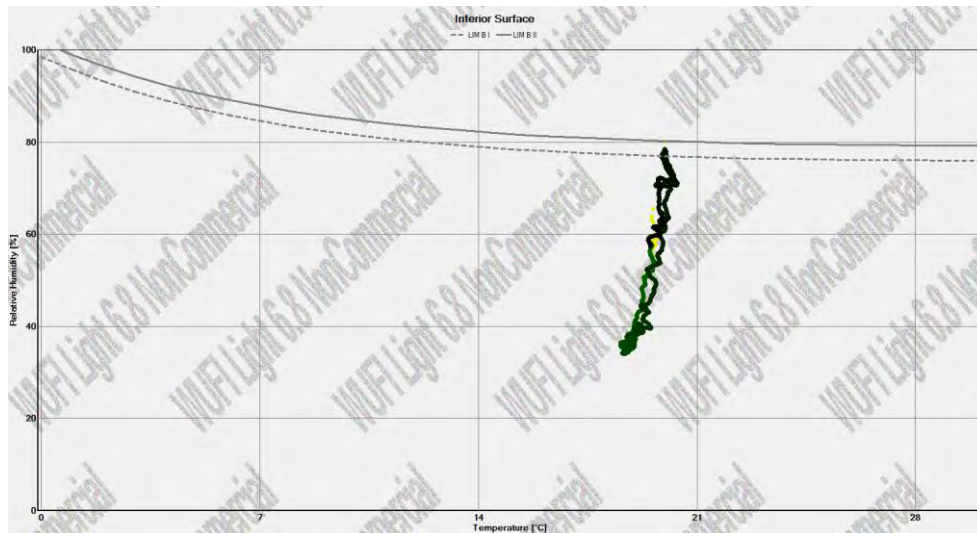
Slika 92. Odnos temperature kontaktne zone kamena i hidrauličnog vapnenog šprica i temperature rosišta zida na sjeverozapadu za 10-godišnje razdoblje ispitivanja

Jednak odnos temperature kritične zone i temperature rosišta ima i kontaktna zona hidrauličnog vapnenog šprica i aerogel žbuke.

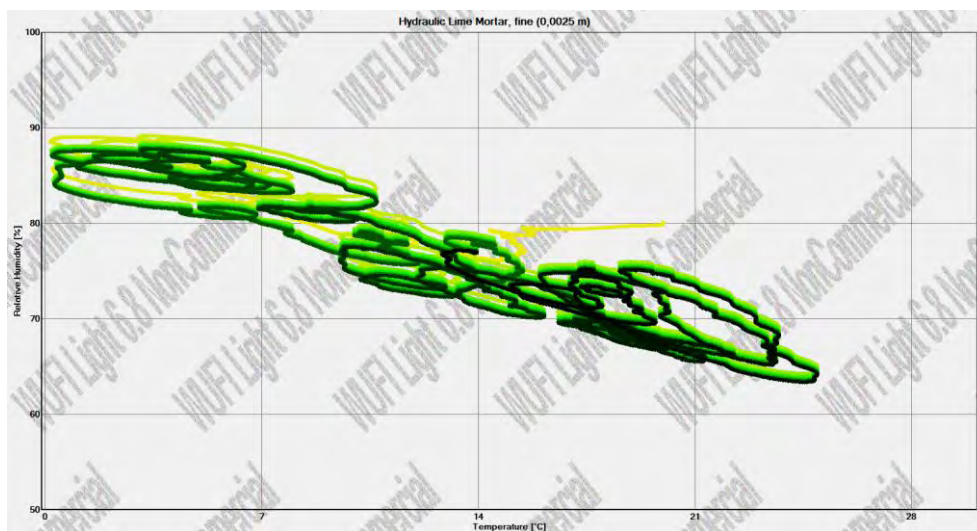
Vjerojatnost pojave kondenzacije možemo provjeriti i preko tzv. izopleta. Iste grafički prikazuju relativnu vlažnost u svakom vremenskom koraku u odnosu na pripadajuću temperaturu. Vremenska referenca označena je spektrom boja od žute (prvi vremenski korak) do crne (zadnji vremenski korak). Ovo omogućuje, između ostalog, procjenu pojavljuju li se istovremeno uvjeti visoke temperature i visoke vlažnosti, što može stvoriti probleme za određene materijale.

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni, što znači da je su odabrane mjere energetske obnove korektne (Slika 93, Slika 94).

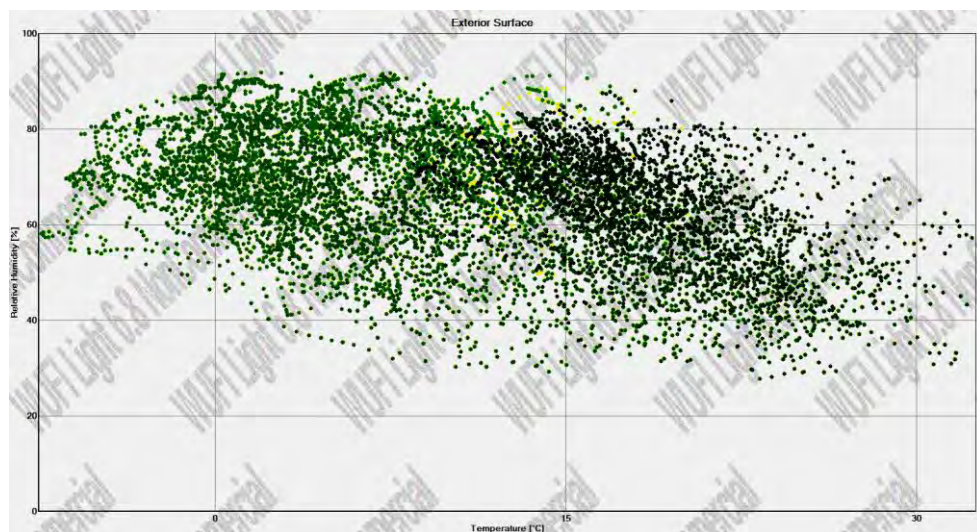
Ovaj model procjene je neprikladan za primjenu na vanjskoj površini, jer vanjski uvjeti poput ultraljubičastog zračenja ili mraza ometaju razvoj plijesni. Niže se navodi primjer primjene modela na vanjsku površinu (Slika 95).



Slika 93. Izoplete za unutarnju površinu zida na sjeverozapadu



Slika 94. Izoplete za kritični sloj u zidu na sjeverozapadu



Slika 95. Izoplete za vanjsku površinu zida na sjeverozapadu

9.1.2. Rezultati proračuna krova

Površinska temperatura konstrukcije krova ispod ventilacijskog sloja najvažniji je čimbenik za higrotermalno ponašanje kosih krovova. Zračni sloj između crijepova i konstrukcije krova te izmjena zraka s vanjskim zrakom smanjuju izmjenu topline između krovnog pokrova i krovne konstrukcije te utječu na razinu vlage unutar krova.

Ventilacijski sloj obično se sastoji od letvi i kontra letvi i osigurava nekoliko funkcija:

- Kontra letve omogućuju slobodno otjecanje vode na difuzijskoj ili sekundarnoj hidroizolacijskoj membrani/podlozi.
- Izmjena zraka smanjuje pregrijavanje krova tijekom ljeta.
- Zračni sloj pomaže uklanjanju vlage uzrokovane konvekcijom ili prijenosom pare iz unutarnjeg klimatskog prostora ili kondenzirane rose tijekom razdoblja pretjeranog hlađenja.

U WUFI-ju postoje tri načina modeliranja ventiliranog krova.

Prva opcija ne uzima u obzir zračni sloj niti utjecaj zračenja. Koristi vanjsku temperaturu zraka bez dodatnog otpora izravno na površini ispod ventiliranog sloja, što može dovesti do prilično niskih površinskih temperatura i u nekim slučajevima visokog sadržaja vlage unutar krovne konstrukcije. Ova metoda se može smatrati scenarijem najgoreg slučaja.

Druga opcija je modeliranje krovnog pokrova i zračnog sloja. U tom se slučaju obično koriste parametri zračenja krovnog pokrova, a zračni sloj između krovnog pokrova i konstrukcije krova modelira se korištenjem učinkovitih parametara za prijenos topline i vlage putem konvekcije i zračenja. Za simulaciju izmjene zraka s vanjskim zrakom koristi se izvor izmjene zraka. Ova metoda je bliža stvarnosti, ali je potrebno unaprijed znati stopu izmjene zraka, a razlikovanje između gornjeg i donjeg dijela krova nije moguće.

Treća metoda je izračun s parametrima zračenja krovnog pokrova izravno na površini konstrukcije krova. U tom slučaju, zračni sloj se ne simulira eksplicitno. Može rezultirati značajnim hlađenjem tijekom noći i visokim površinskim temperaturama u sunčanim razdobljima. Precizan izračun ventilirane krovne konstrukcije zahtijevao bi razmatranje svih relevantnih procesa prijenosa topline. Međutim, ti parametri često su nepoznati u praksi. [47]

Odabrana je druga metoda modeliranja krovnog pokrova i ventiliranog sloja zraka koja je najbliža stvarnim uvjetima. Postavljeni broj izmjena zraka za ventilirani sloj je 20 h^{-1} što je u skladu s istraživanjima objavljenima u [48]. Analizirane su krovne plohe orijentacije jugoistok te sjeverozapad. Osjetljivija krovna ploha promatrana je u nastavku s optimizacijom parne brane te je uspoređena sa slučajem bez infiltracije (savršena izvedba

parne brane). Krov je promatran u dva presjeka: presjek kroz drveni rog te presjek između drvenih rogova (kroz izolaciju).

Kod modeliranja krova bilo je potrebno uzeti u obzir infiltraciju. Istu je moguće uzeti u obzir na dva načina, odnosno dva su potencijalna mjesta za prodor vlage u konstrukciju krova („odozdo“ i „odozgo“).

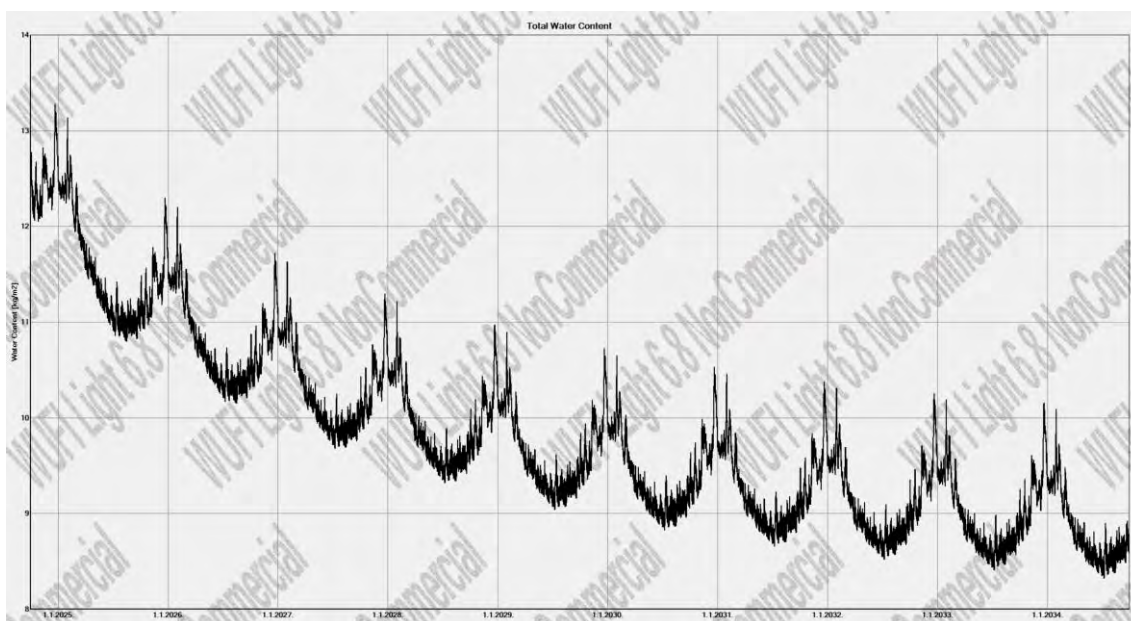
Parna brana se postavlja s unutarnje strane termoizolacije, prema unutrašnjosti zgrade. Sprečava prodor vodene pare iz unutrašnjosti zgrade u krovni sustav, zadržavajući vlagu unutar zgrade. Međutim ako je parna brana oštećena ili nije savršeno postavljena, može doći do prodora vlage, što može uzrokovati kondenzaciju iznad parne brane i unutar termoizolacije („odozdo“).

Vodonepropusna-paropropusna folija postavlja se iznad termoizolacije, a ispod krovnog pokrova. Omogućava prolaz vodene pare iz unutrašnjosti prema vani, a sprečava ulazak vode izvana. Međutim, ako je ventilacija krova loša, određena količina vlage se može zadržati ispod folije, što može dovesti do stvaranja kondenzata („odozgo“).

Krov orijentacije jugoistok i krov orijentacije sjeverozapad u prvoj su etapi modelirani s parnom branom čije karakteristike odgovaraju ranije projektiranim karakteristikama parne brane u KI Expert Plus-u. Rezultati su priloženi u nastavku.

9.1.2.1. Krov JI

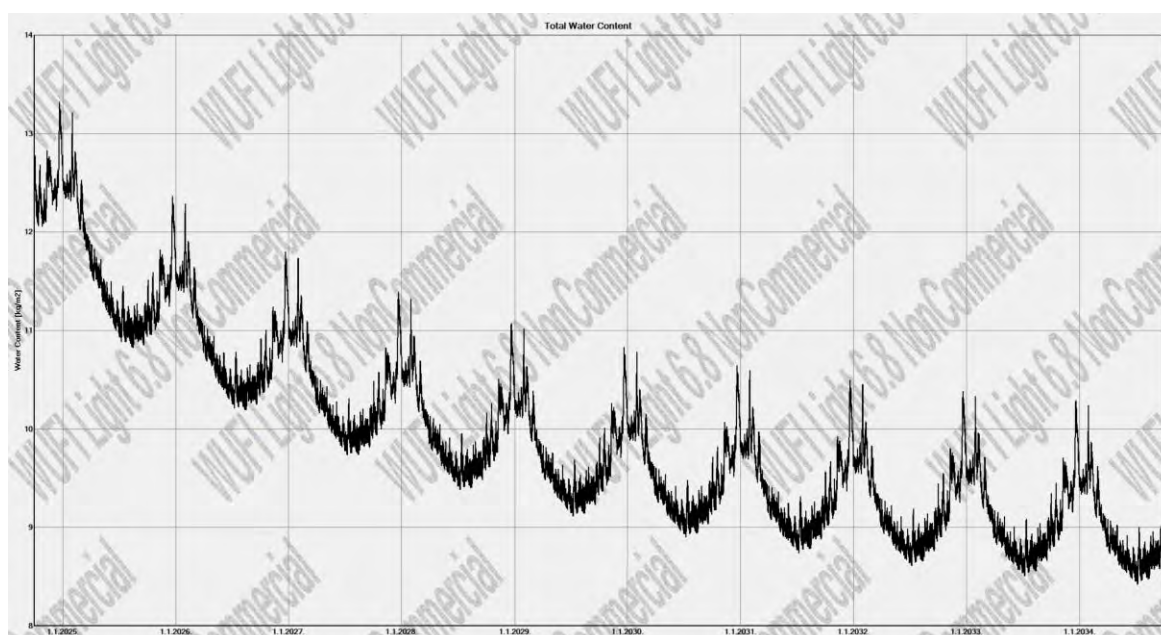
- Presjek kroz rog



Slika 96. Ukupan sadržaj vlage u krovu JI s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 31. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,27	0,84	79,93
Air Layer 30 mm	1,88	0,66	0,13	5,84
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	44,12	32,70	64,63
Softwood	60,00	41,91	41,78	60,00
MB Rock	0,30	0,17	0,12	0,44
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,32	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,30	2,40	6,30



Slika 97. Ukupan sadržaj vlage u krovu JI s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 32. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

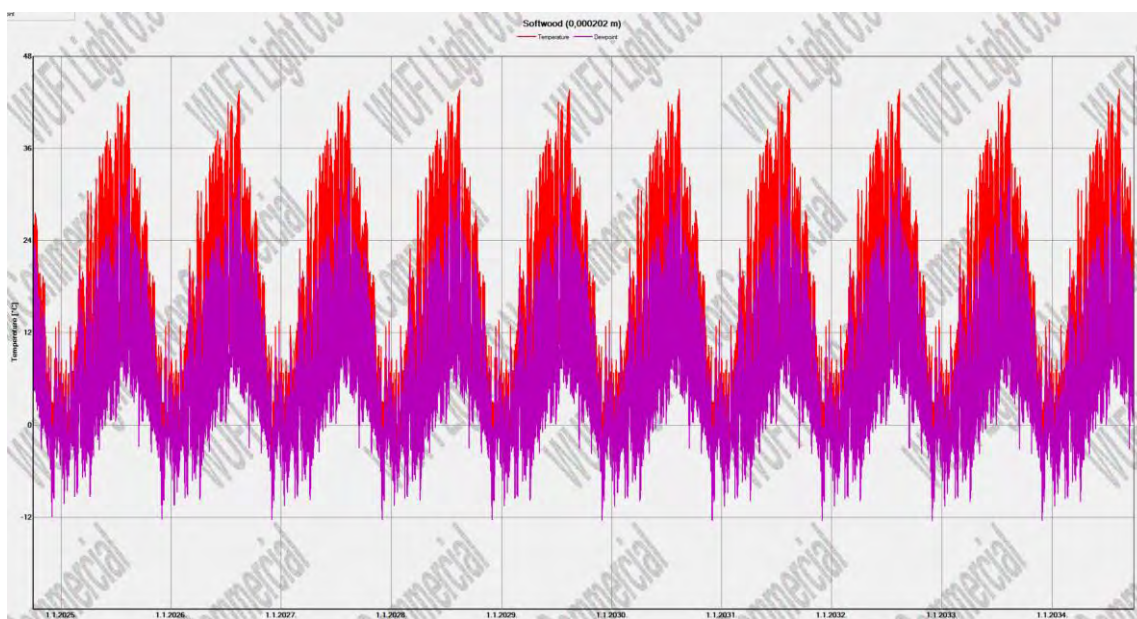
Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,29	0,84	80,12
Air Layer 30 mm	1,88	0,66	0,13	5,89
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	44,54	32,93	66,61
Softwood	60,00	42,41	42,28	60,00
MB Rock	0,30	0,17	0,13	0,44
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,32	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,30	2,40	6,30

Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltracije preko parne brane i infiltracije preko krovne folije. Minimalna razlika vidljiva je analizom sadržaja vode u slojevima krova, a prema kojoj krov u slučaju infiltracije preko krovne folije, u određenom trenutku, pohranjuje minimalno veći sadržaj vlage u odnosu na krov s infiltracijom preko parne brane.

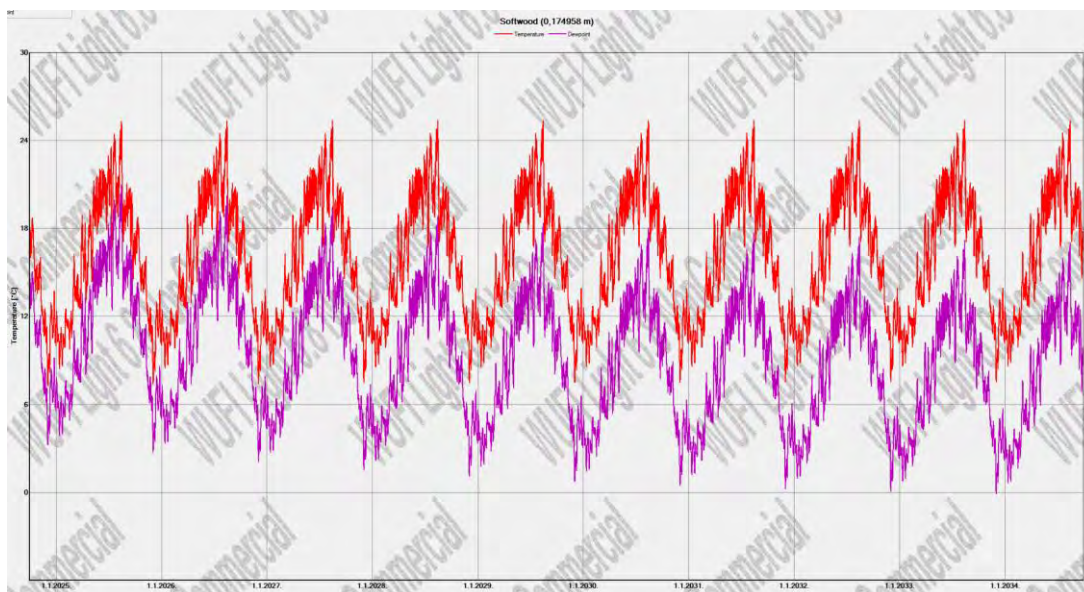
Dinamička ravnoteža se postiže nakon 6-7 godina.

Temperaturne krivulje su jednake za oba slučaja infiltracije i prikazane su u nastavku.

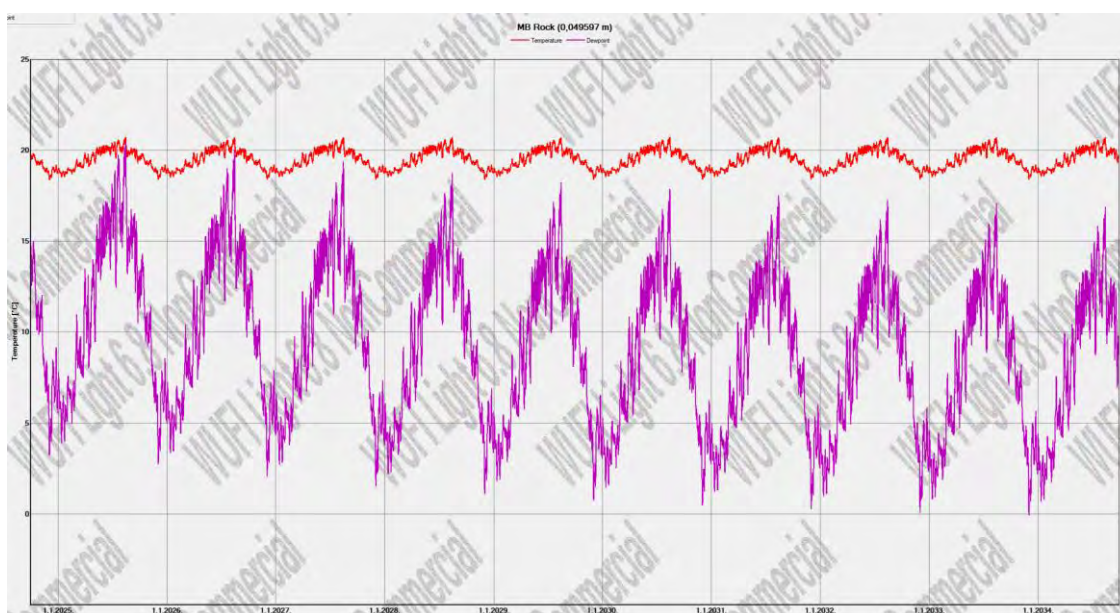
Očekivano, bliže vanjskoj strani krovne konstrukcije vrijednosti temperature su vrlo bliske temperaturi rosišta, ali niti u jednom trenutku temperatura rosišta nije viša od temperature elementa. Ako na vanjskim elementima zgrade nema odgovarajuće ventilacije, dolazi do nakupljanja vlage. Te se površine hlade, a njihova se temperatura približava temperaturi rosišta.



Slika 98. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija

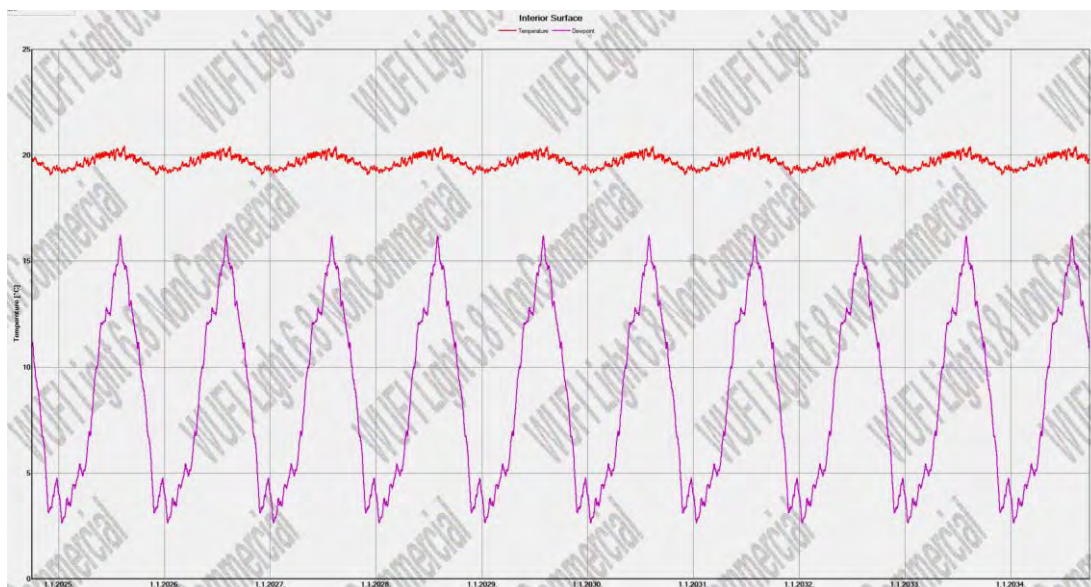


Slika 99. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija

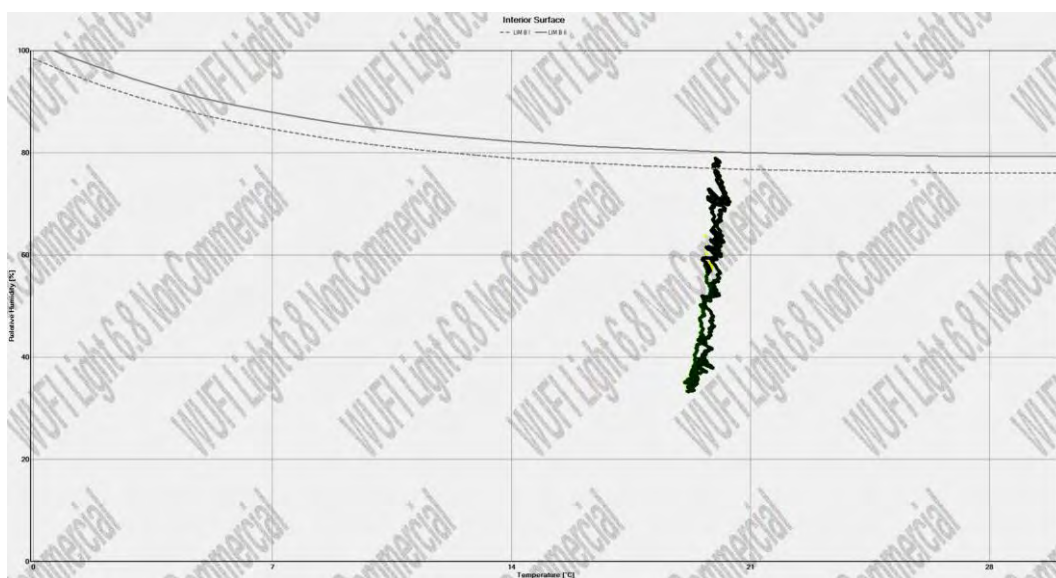


Slika 100. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija

Uočava se pojava ljetnog kondenzata kroz prve dvije godine životnog vijeka krova, i to u kontaktnoj zoni mineralne vune i parne brane.



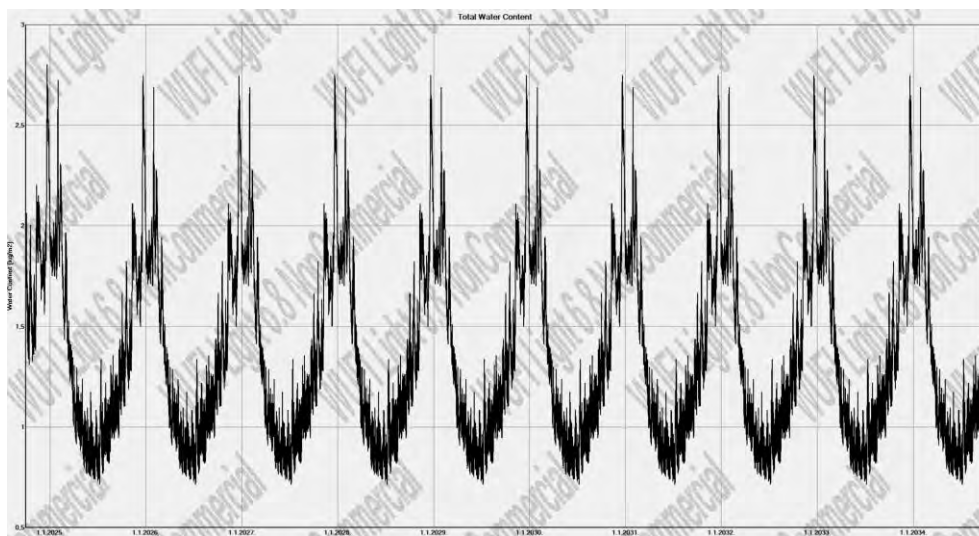
Slika 101. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija



Slika 102. Izoplete za unutarnju stranu zida JI (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 102).

- Presjek kroz izolaciju

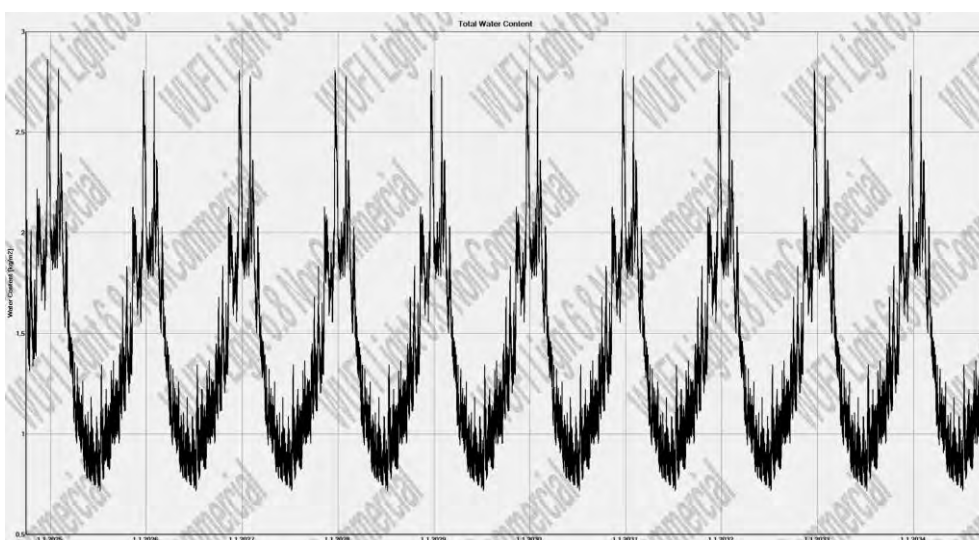


Slika 103. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 33. Sadržaj vlage u slojevima krova II s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Water Content [kg/m³]

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,56	0,81	87,77
Air Layer 30 mm	1,88	0,67	0,11	6,64
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	43,77	27,53	67,35
MB Rock	0,30	0,17	0,11	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,91
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30



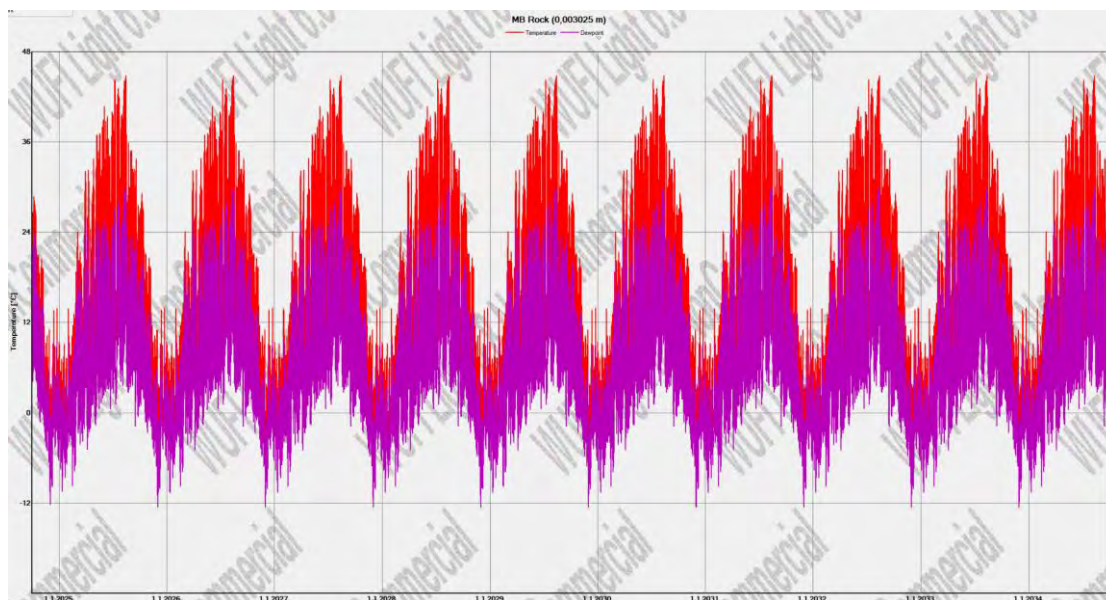
Slika 104. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 34. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

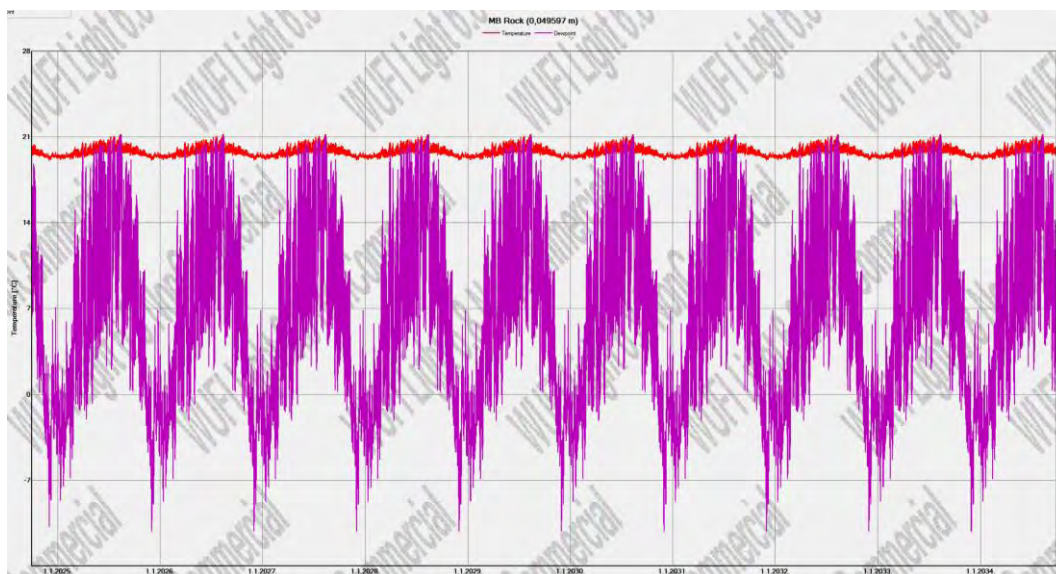
Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,58	0,81	88,02
Air Layer 30 mm	1,88	0,67	0,11	6,74
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	44,39	27,63	71,60
MB Rock	0,30	0,17	0,12	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,93
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30

Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltraciju preko parne brane i infiltracije preko krovne folije, kao i u slučaju presjeka kroz rog. Minimalna razlika vidljiva je analizom sadržaja vode u slojevima krova, a prema kojoj krov u slučaju infiltracije preko krovne folije, u određenom trenutku, pohranjuje minimalno veći sadržaj vlage u odnosu na krov s infiltracijom preko parne brane

Dinamička ravnoteža je postignuta već prvu godinu.

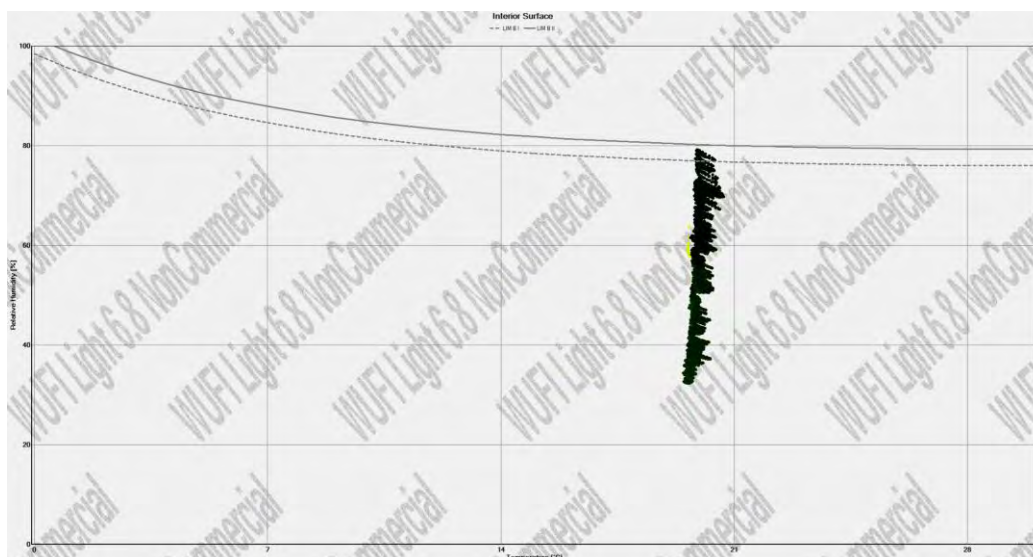


Slika 105. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplote i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija



Slika 106. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija

Uočava se pojava ljetnog kondenzata kroz cijelo desetogodišnje razdoblje proračuna. Može se zaključiti kako je upravo presjek kroz izolaciju kritičan presjek i potrebno ga je analizirati s posebnom pažnjom. Projektiranim slojevima nije postignut optimum, pa će se predložiti novo rješenje u nastavku.

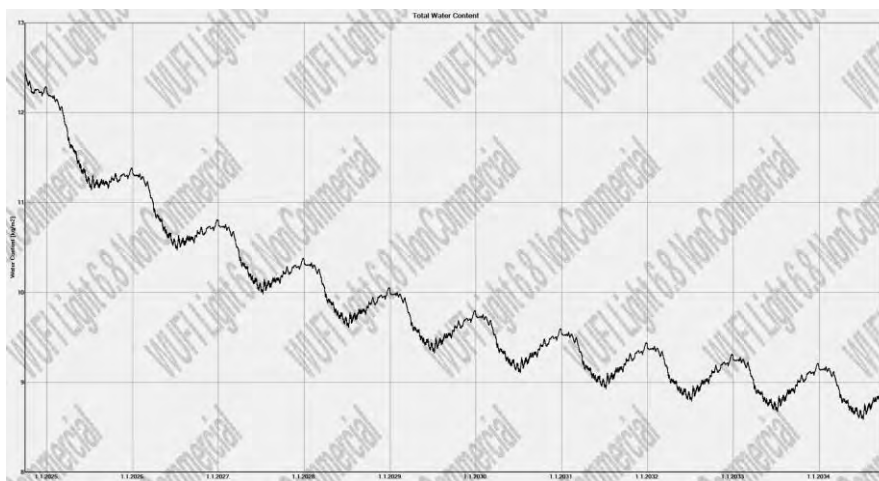


Slika 107. Izoplete za unutarnju stranu krova II (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 107).

9.1.2.2. Krov SZ

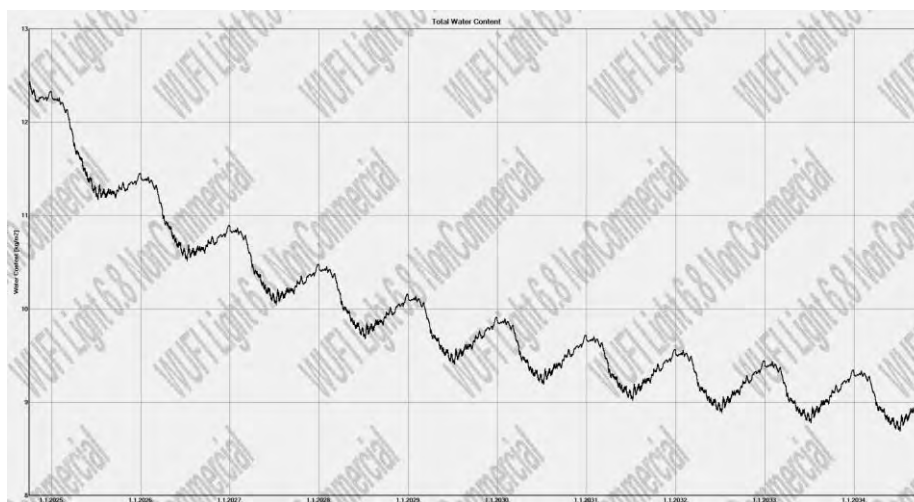
- Presjek kroz rog



Slika 108. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 35. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	11,10	4,38	23,23
Air Layer 30 mm	1,88	1,04	0,43	2,27
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,00
Softwood	60,00	47,78	39,87	60,31
Softwood	60,00	42,45	42,20	60,00
MB Rock	0,30	0,16	0,12	0,32
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,35	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,33	2,40	6,30



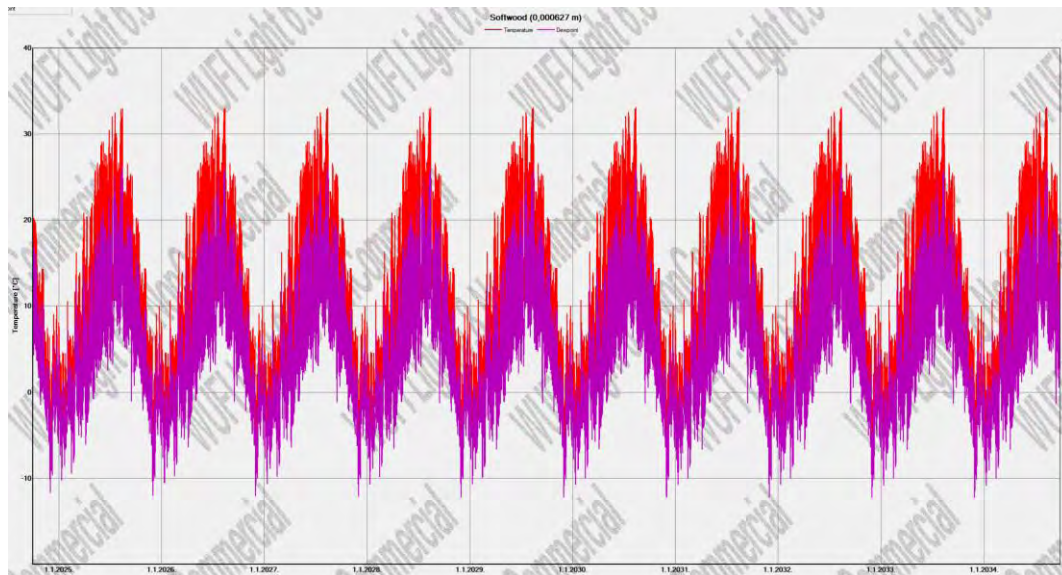
Slika 109. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 36. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

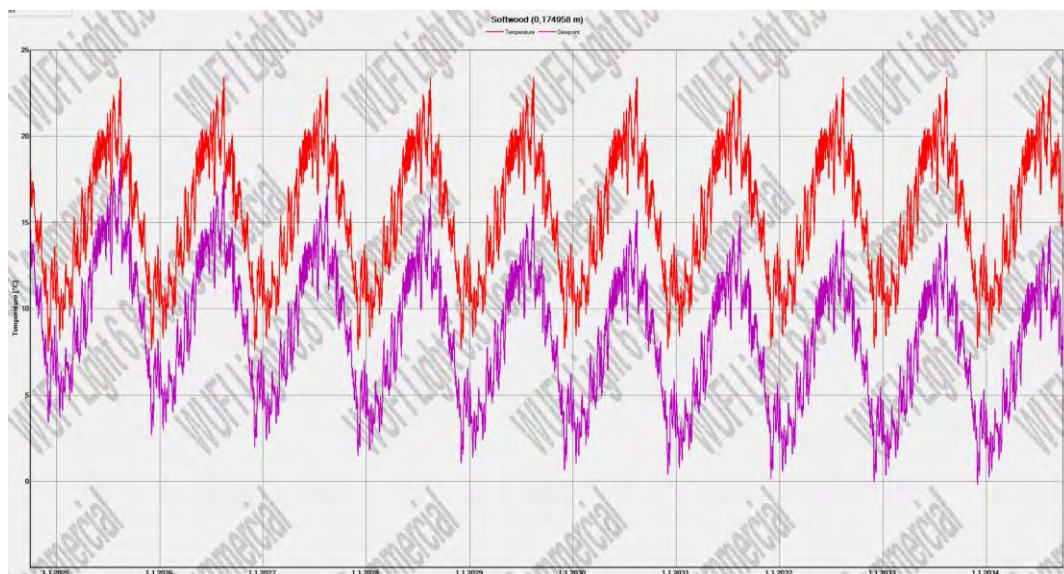
Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	11,18	4,40	23,80
Air Layer 30 mm	1,88	1,05	0,44	2,33
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,00
Softwood	60,00	48,24	40,17	60,35
Softwood	60,00	42,98	42,75	60,00
MB Rock	0,30	0,16	0,12	0,32
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,35	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,33	2,40	6,30

Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltraciju preko parne brane i infiltracije preko krovne folije. Minimalna razlika vidljiva je analizom sadržaja vode u slojevima krova, a prema kojoj krov u slučaju infiltracije preko krovne folije, u određenom trenutku, pohranjuje minimalno veći sadržaj vlage u odnosu na krov s infiltracijom preko parne brane. Isti se neznatno sporije suši.

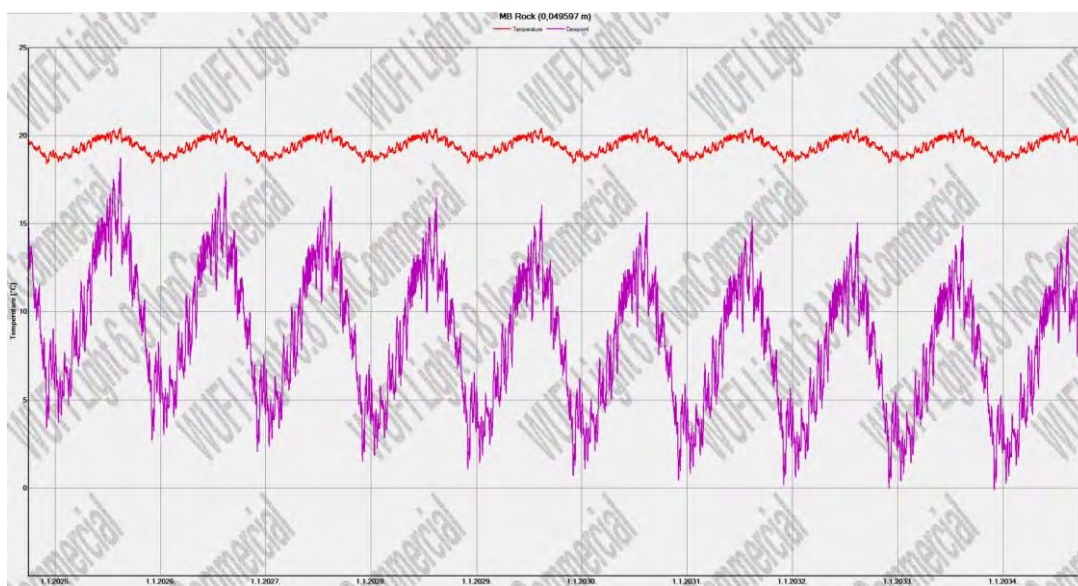
Temperaturne krivulje su jednake za oba slučaja infiltracije i prikazane su u nastavku.



Slika 110. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i dašćane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija

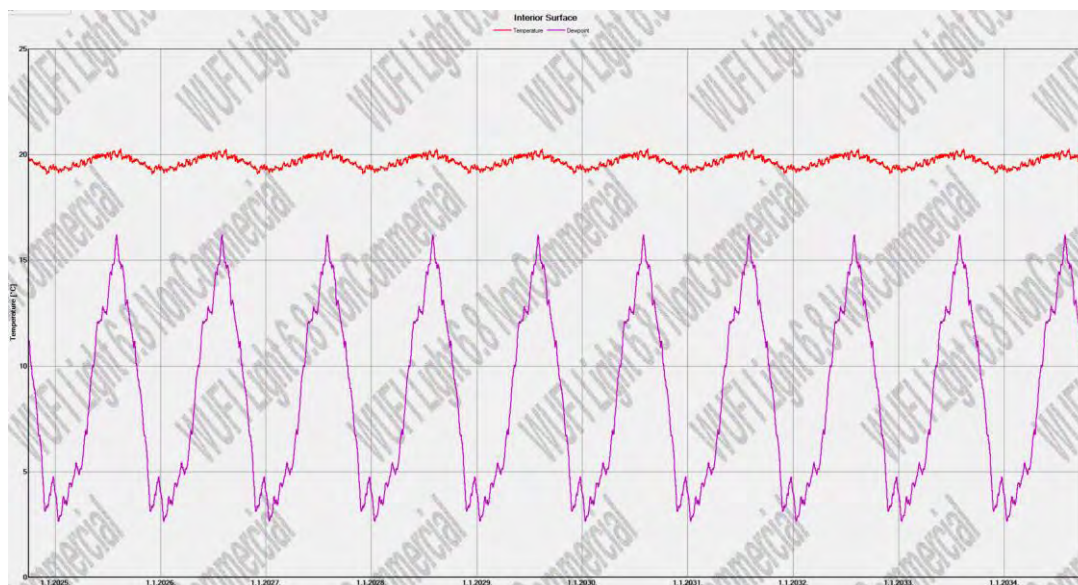


Slika 111. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija

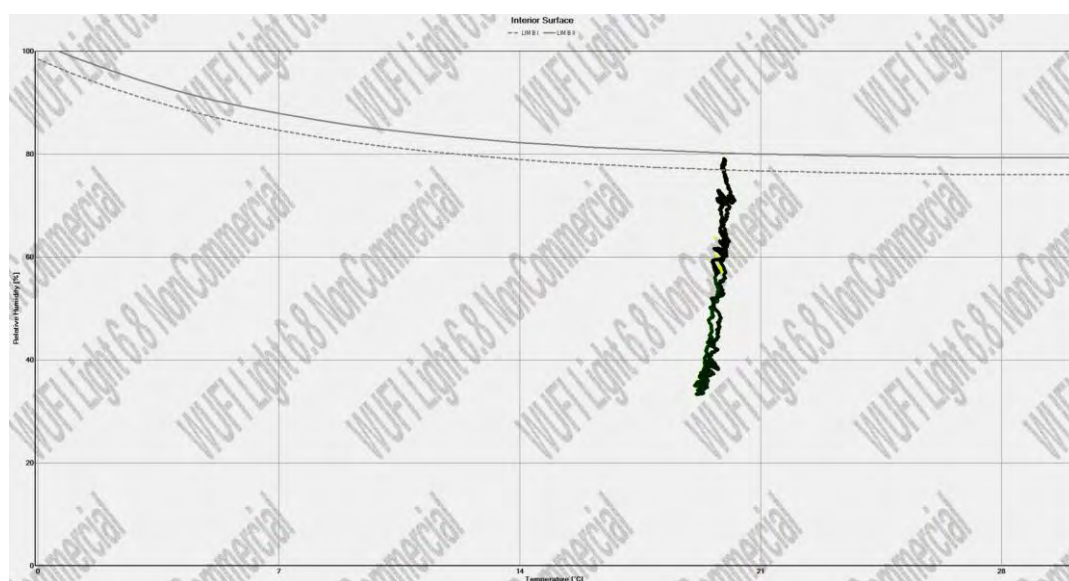


Slika 112. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija

Za razliku od krova orijentacije jugoistok, na kontaktu mineralne vune i parne brane nema pojave ljetnog kondenzata.



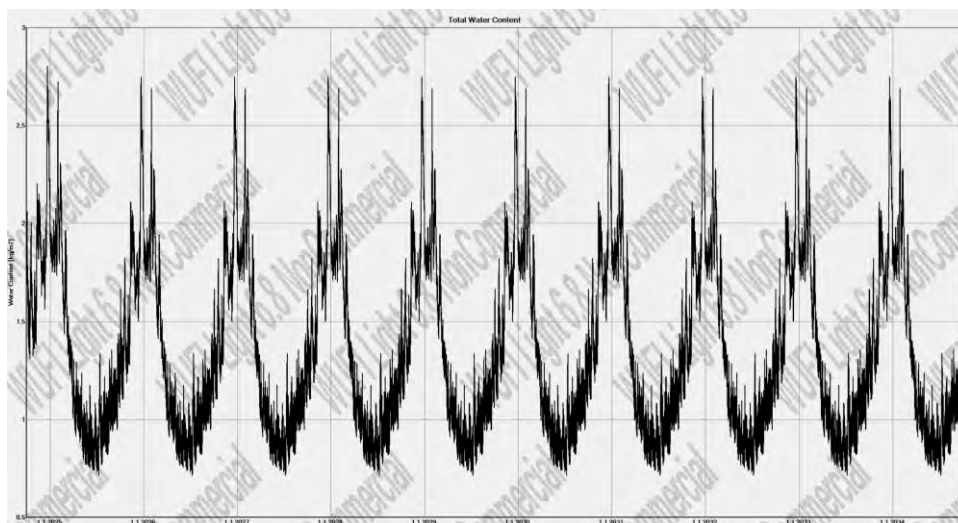
Slika 113. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija



Slika 114. Izoplete za unutarnju stranu zida na sjeverozapadu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni.

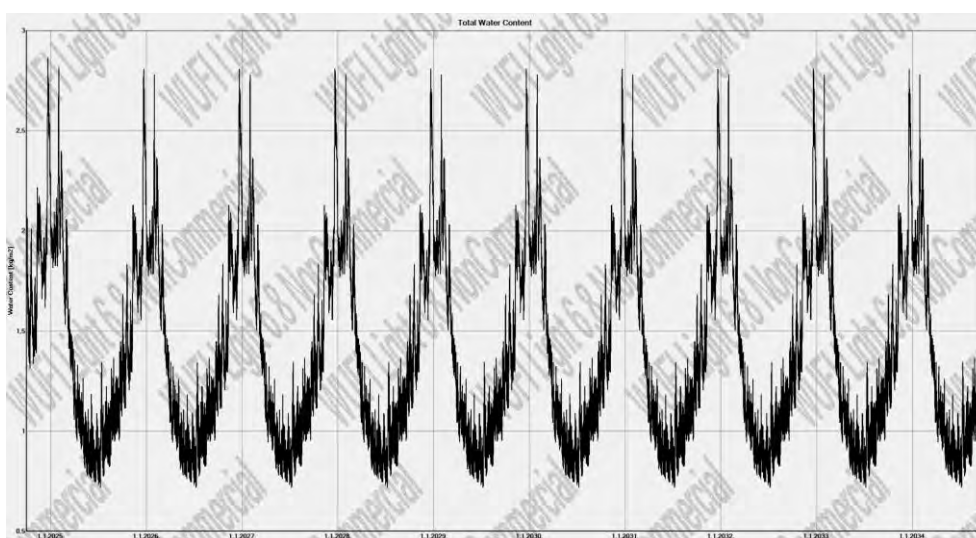
- Presjek kroz izolaciju



Slika 115. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 37. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,56	0,81	87,77
Air Layer 30 mm	1,88	0,67	0,11	6,64
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	43,77	27,53	67,35
MB Rock	0,30	0,17	0,11	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,91
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30



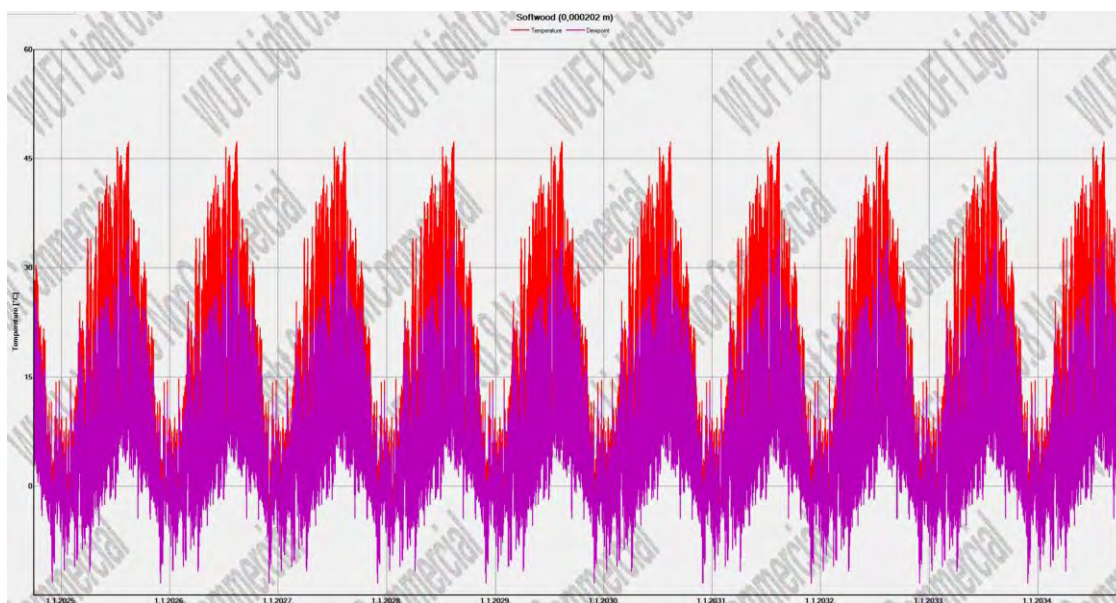
Slika 116. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Tablica 38. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

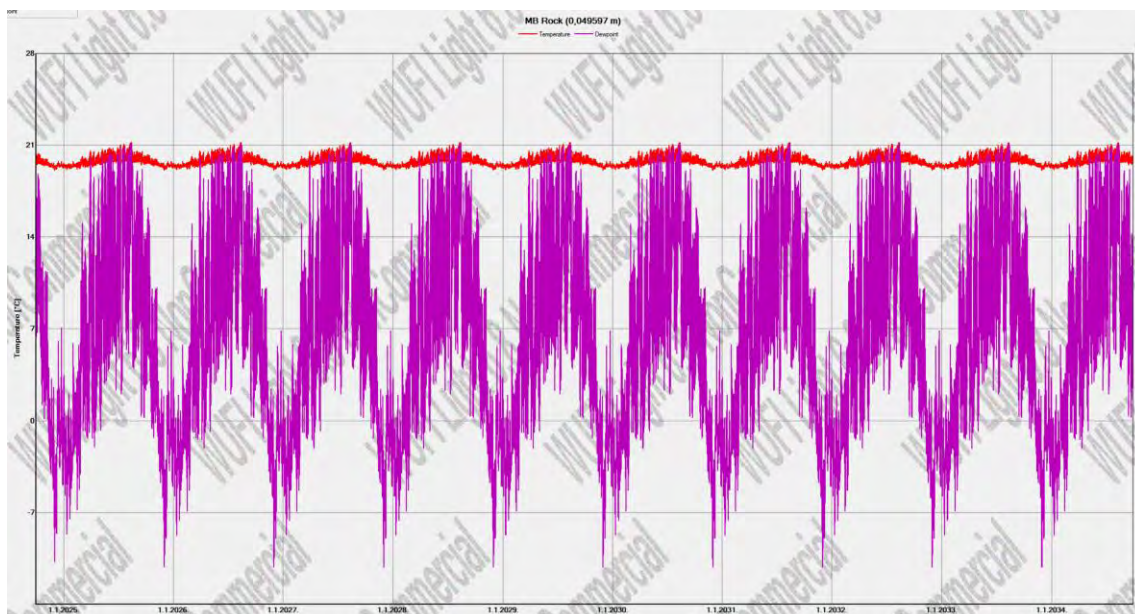
Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,58	0,81	88,02
Air Layer 30 mm	1,88	0,67	0,11	6,74
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	44,39	27,63	71,60
MB Rock	0,30	0,17	0,12	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,93
TECTOFIN RG (sd=36m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30

Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltraciju preko parne brane i infiltracije preko krovne folije.

Dinamička ravnoteža je postignuta već prvu godinu.

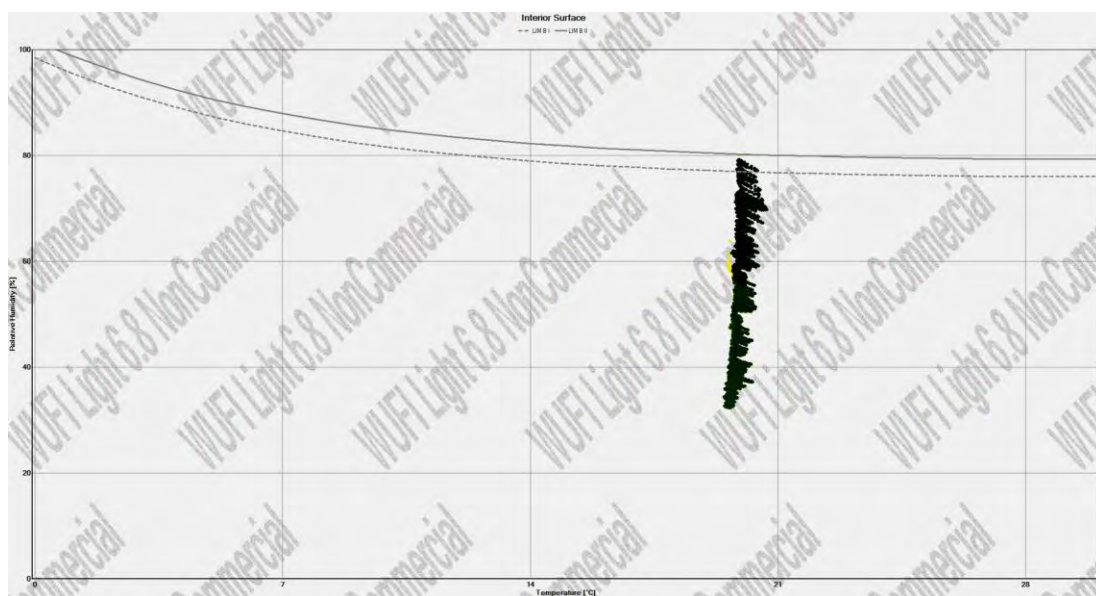


Slika 117. Prikaz temperature kontaktne zone dašćane oplote i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija



Slika 118. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija

Uočava se pojava ljetnog kondenzata kroz cijelo desetogodišnje razdoblje proračuna.



Slika 119. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 119).

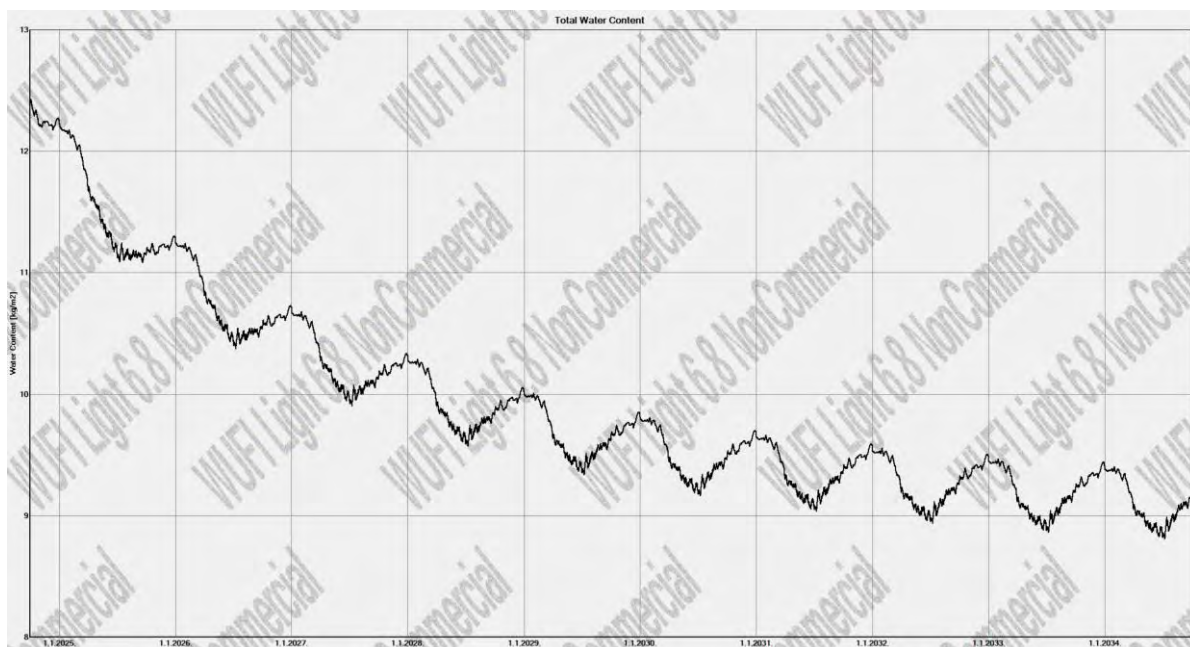
Krov orijentacije sjeverozapad (SZ) pohranjuje više vlage na kraju promatranog razdoblja, pa je ocijenjen kao „osjetljiviji“ te je na njegovom primjeru u nastavku optimizirana parna brana zbog pojave ljetnog kondenzata u presjeku između drvenih rogova, odnosno kroz izolaciju.

9.1.2.3. Krov SZ optimiziran pametnom parnom branom

Inicijalno projektirana standardna parna brana zamijenjena je pametnom parnom branom zbog uočene pojave ljetnog kondenzata u kontaktnoj zoni mineralne vune i standardne parne brane.

Pametne parne brane su materijali s promjenjivim otporom na prolazak vodene pare, što znači da mogu mijenjati svoju propusnost ovisno o uvjetima u okruženju. Tijekom zime, kada je unutarnja vlaga viša nego vani, brana zadržava paru unutar objekta, sprječavajući njezino prodiranje u termoizolaciju. Ljeti, kada su temperature više, a u skladu s tim i vanjska vlažnost, brana postaje propusnija, omogućujući vlazi koja je eventualno dospjela u konstrukciju da izađe van, tj. omogućuje nesmetano isušivanje krovne konstrukcije prema prostoru. [49]

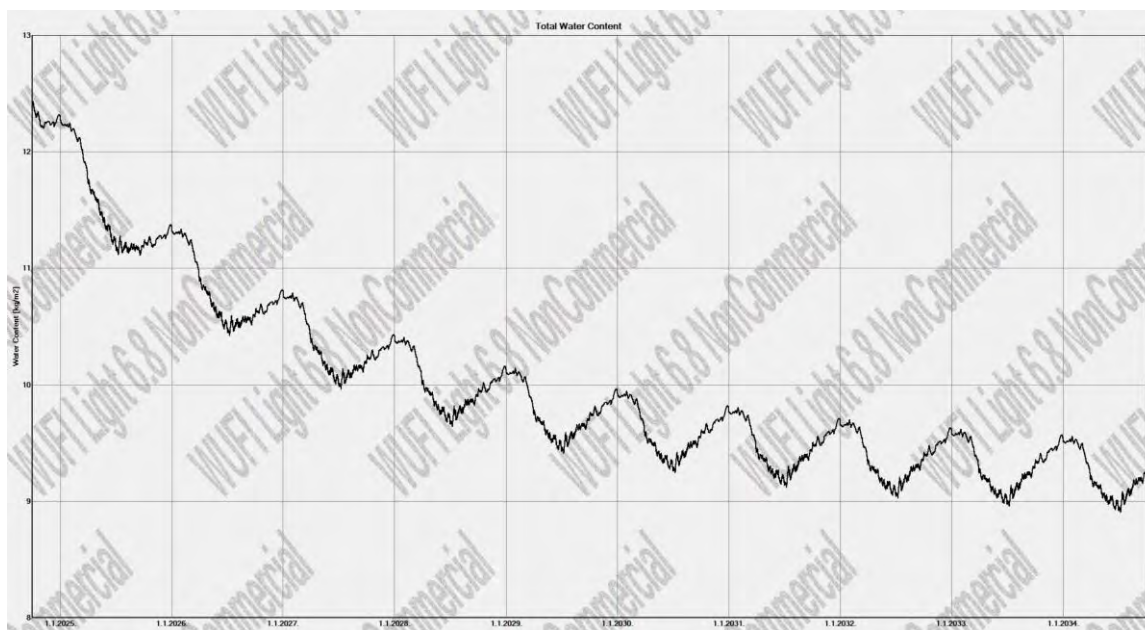
- Presjek kroz rog



Slika 120. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz rog)

Tablica 39. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz rog)

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	11,12	4,39	23,23
Air Layer 30 mm	1,88	1,04	0,44	2,27
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,00
Softwood	60,00	47,94	40,04	60,31
Softwood	60,00	43,93	43,45	60,00
MB Rock	0,30	0,17	0,13	0,30
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,35	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,32	2,40	6,30



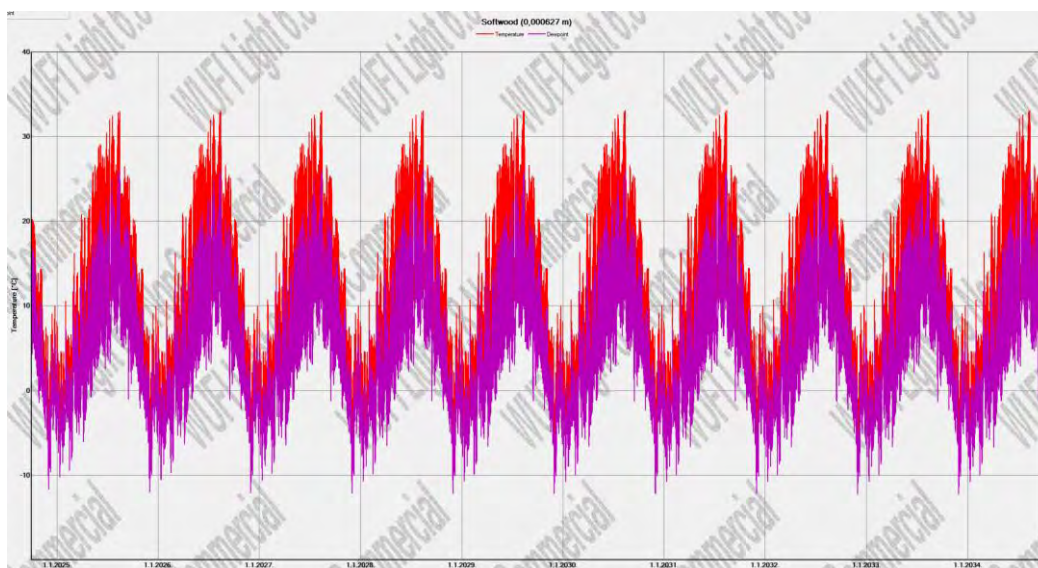
Slika 121. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnju foliju (presjek kroz rog s pametnom parnom branom)

Tablica 40. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnju foliju (presjek kroz rog s pametnom parnom branom)

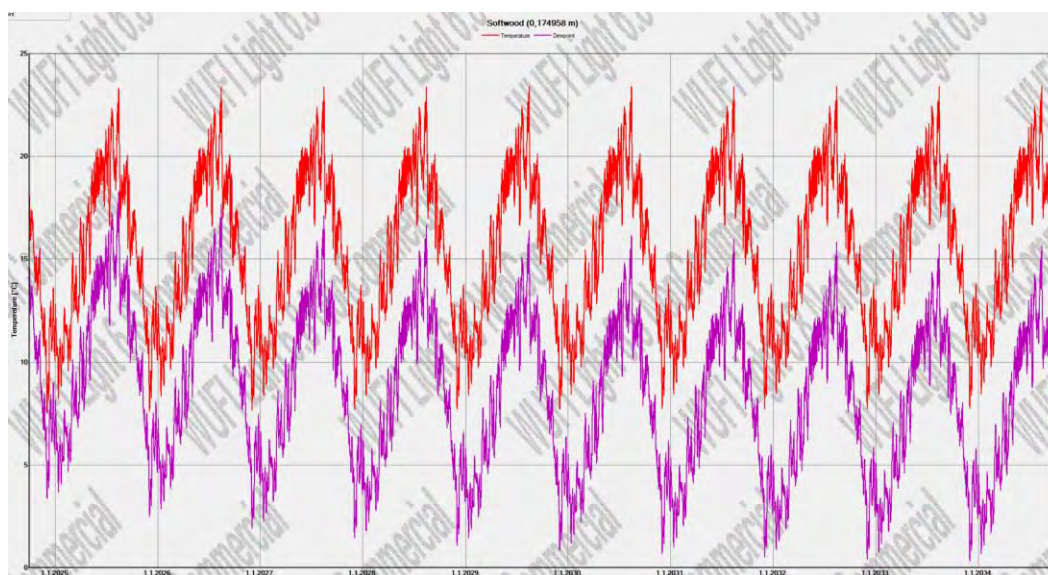
Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	11,21	4,40	23,80
Air Layer 30 mm	1,88	1,05	0,44	2,33
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,00
Softwood	60,00	48,39	40,33	60,35
Softwood	60,00	44,40	43,95	60,00
MB Rock	0,30	0,17	0,13	0,30
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,35	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,32	2,40	6,30

Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltracije preko parne brane i infiltracije preko krovne folije. Minimalna razlika vidljiva je analizom sadržaja vode u slojevima krova, a prema kojoj krov u slučaju infiltracije preko krovne folije, u određenom trenutku, pohranjuje minimalno veći sadržaj vlage u odnosu na krov s infiltracijom preko parne brane. Isti se neznatno sporije suši.

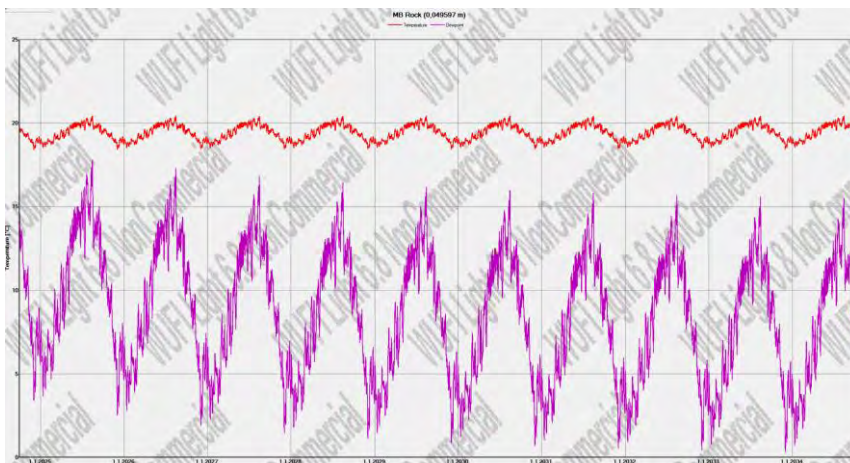
Temperaturne krivulje su jednake za oba slučaja infiltracije i prikazane su u nastavku.



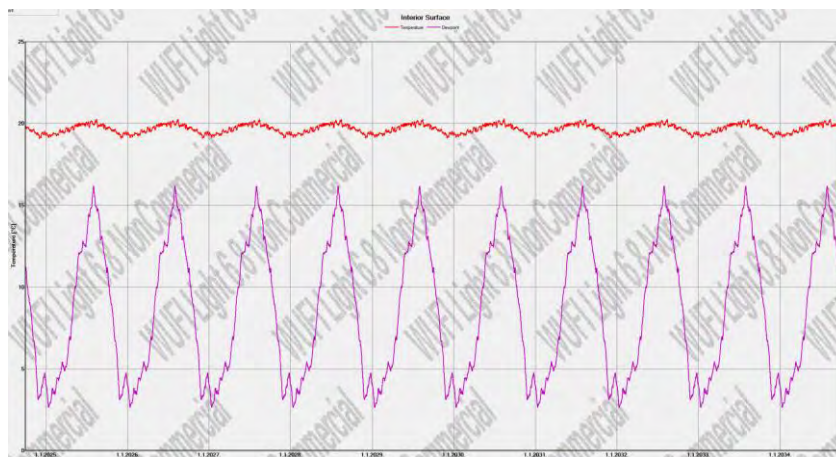
Slika 122. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplate (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije



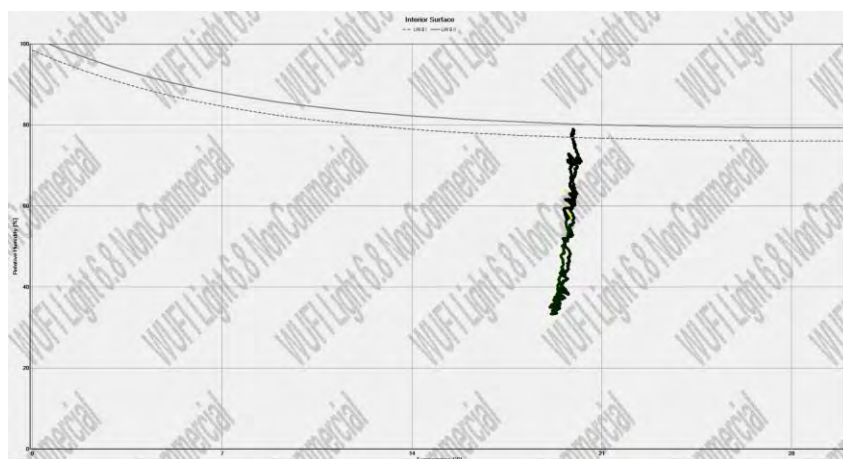
Slika 123. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije



Slika 124. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i pametne parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije



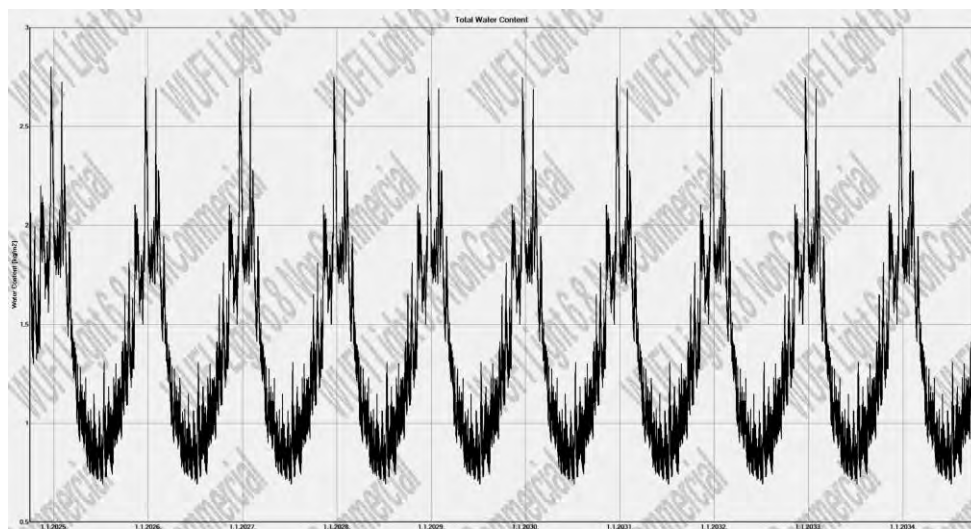
Slika 125. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije



Slika 126. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom) – za oba slučaja infiltracije

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 126).

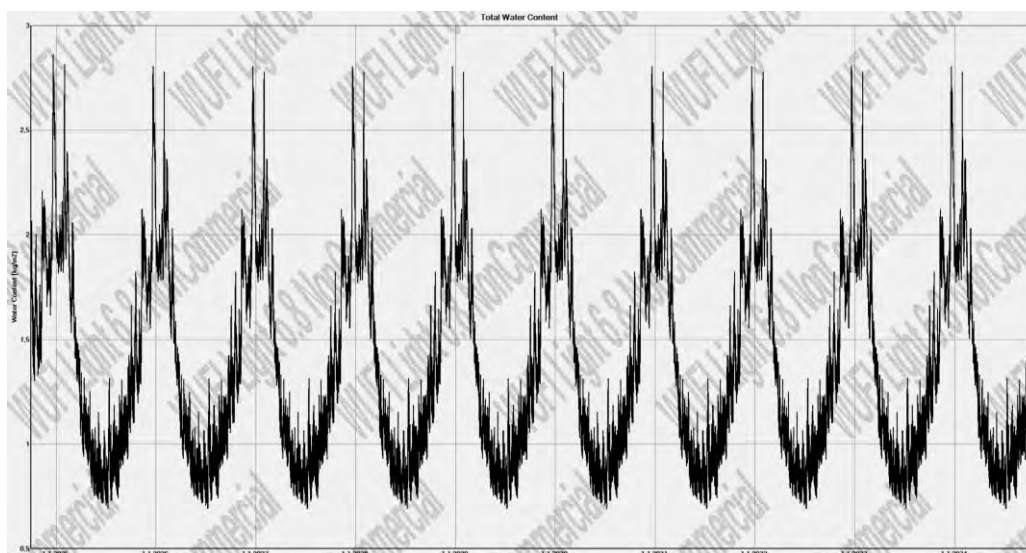
- Presjek kroz izolaciju



Slika 127. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz izolaciju)

Tablica 41. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz izolaciju)

Water Content [kg/m3]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,54	0,80	87,75
Air Layer 30 mm	1,88	0,66	0,11	6,64
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	42,86	26,61	67,36
MB Rock	0,30	0,17	0,11	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,36
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30



Slika 128. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom)

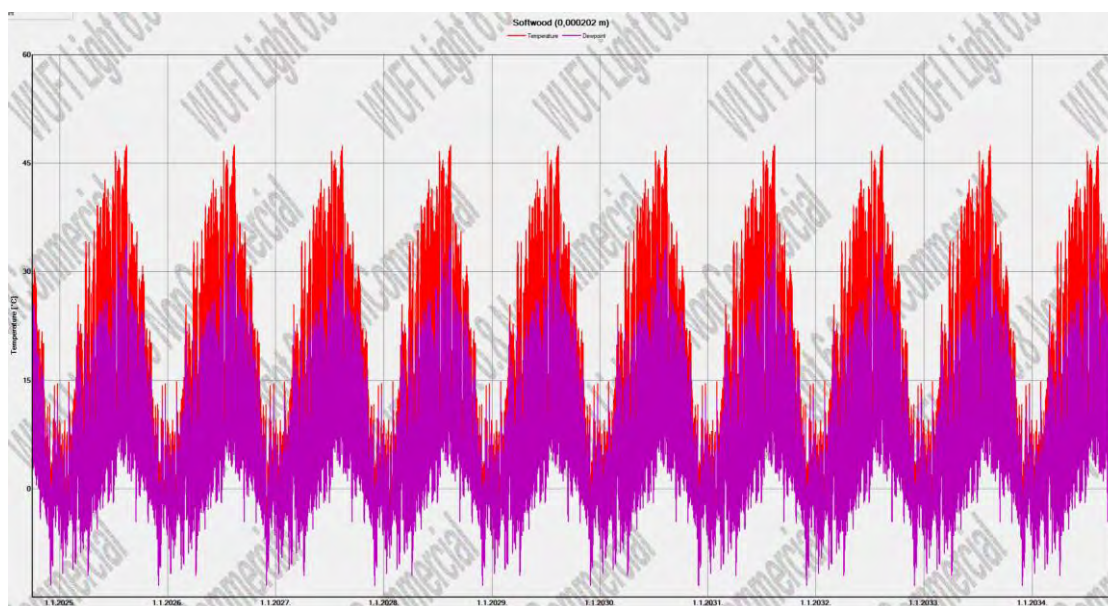
Tablica 42. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom)

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,56	0,81	88,00
Air Layer 30 mm	1,88	0,66	0,11	6,73
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	43,44	26,66	71,60
MB Rock	0,30	0,17	0,12	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,36
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30

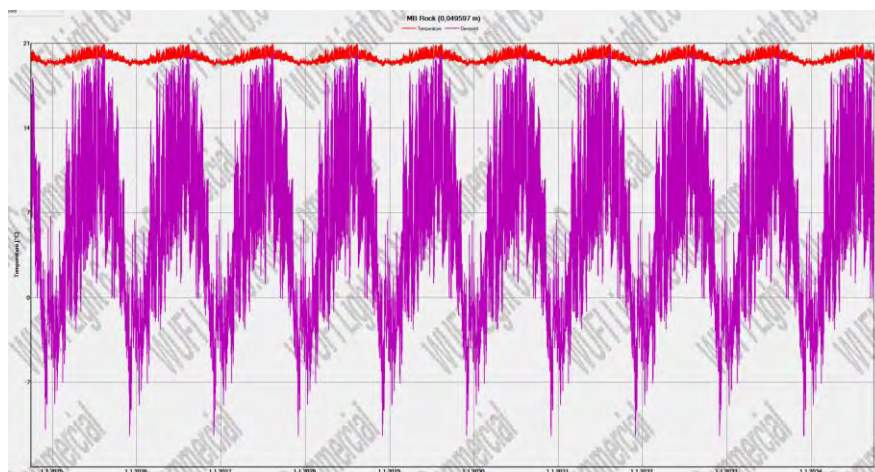
Dijagrami ukupnog sadržaja vlage u krovu se podudaraju za slučaj infiltracije preko parne brane i infiltracije preko krovne folije.

Dinamička ravnoteža je postignuta već prvu godinu.

Temperaturne krivulje su jednake za oba slučaja infiltracije i prikazane su u nastavku.

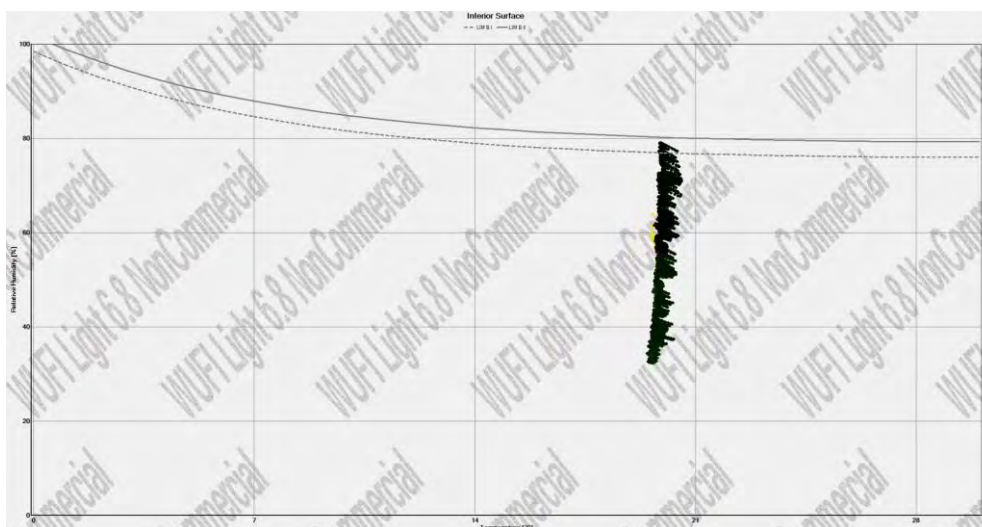


Slika 129. Prikaz temperature kontaktne zone dašcane oplata i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – za oba slučaja infiltracije



Slika 130. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – za oba slučaja infiltracije

Pojava ljetnog kondenzata smanjena je u odnosu na konstrukciju krova sa standardnom parnom branom.



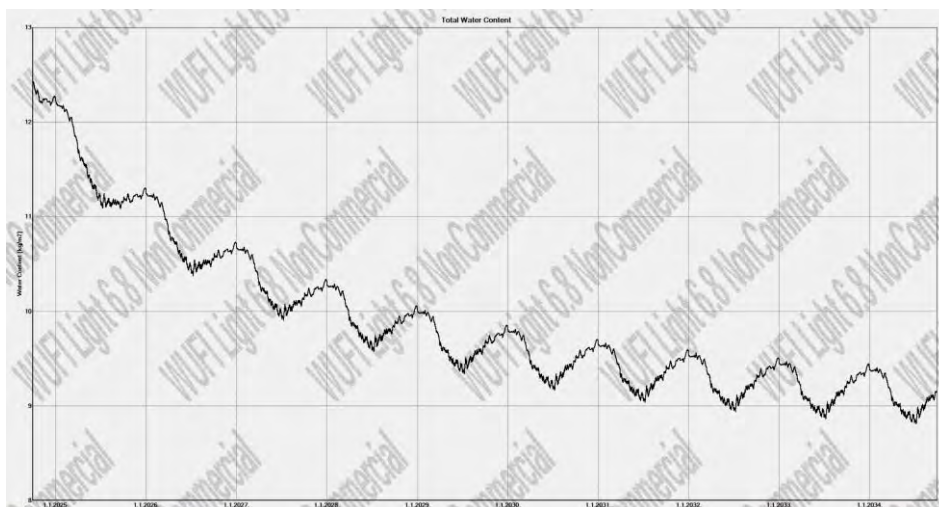
Slika 131. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom) – za oba slučaja infiltracije

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 131).

Primjena pametne parne brane reducirala je pojavu ljetnog kondenzata na kontaktu mineralne vune i parne brane, za oba slučaja infiltracije. Preostalo je dati pregled ponašanja krova u idealnoj situaciji bez infiltracije. U tom slučaju riječ je o dobro ventiliranom krovu u kojem se vlaga ne zadržava pod krovnom folijom, te krovu s parnom branom postavljenom prema pravilima struke, iznad koje također ne dolazi do zadržavanja vlage.

9.1.2.4. Krov SZ bez utjecaja infiltracije

- Presjek kroz rog

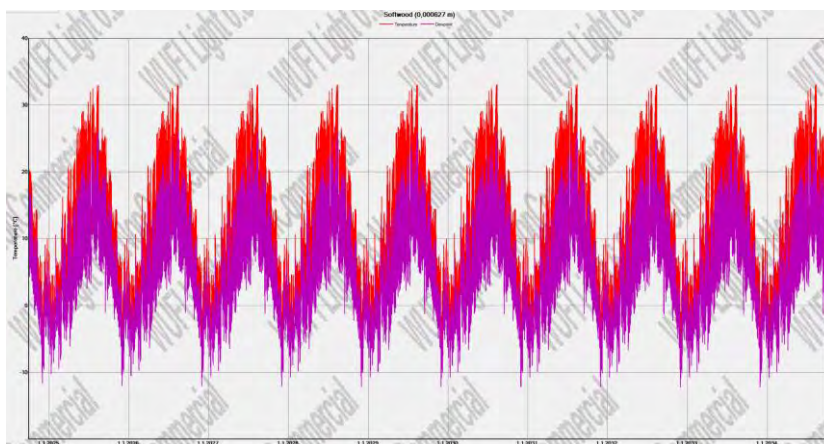


Slika 132. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ bez infiltracije (presjek kroz rog)

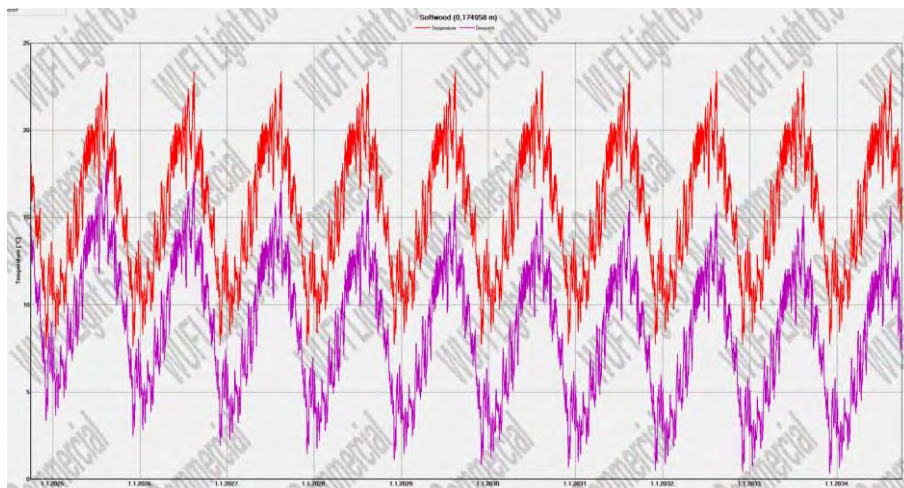
Tablica 43. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ bez infiltracije (presjek kroz rog)

Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	11,12	4,39	23,23
Air Layer 30 mm	1,88	1,04	0,44	2,27
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,00
Softwood	60,00	47,94	40,04	60,31
Softwood	60,00	43,93	43,45	60,00
MB Rock	0,30	0,17	0,13	0,30
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,35	2,43	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,32	2,40	6,30

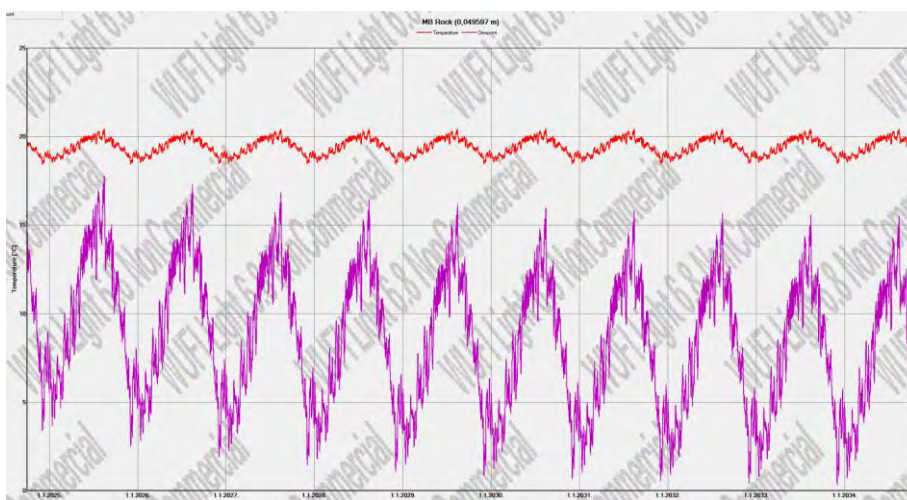
U slučaju proračuna krova bez infiltracije, konstrukcija krova ranije postiže dinamičku ravnotežu i brže se suši.



Slika 133. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplate (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta)

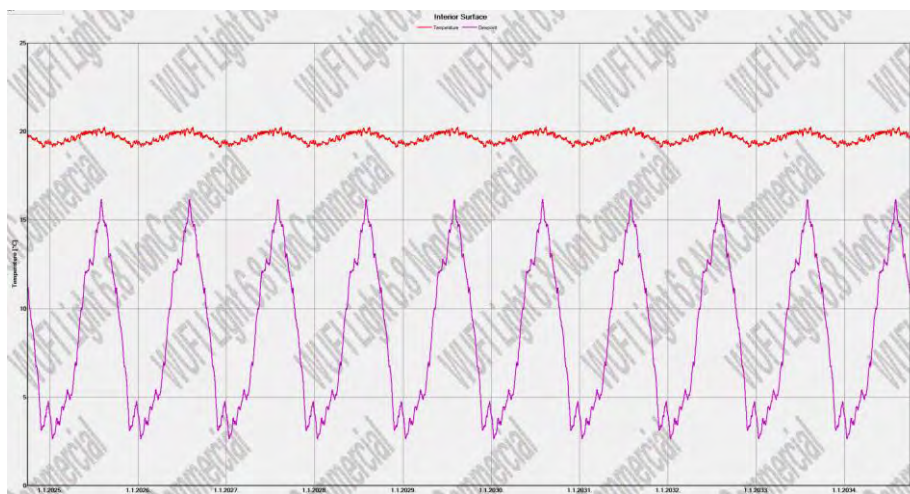


Slika 134. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta)

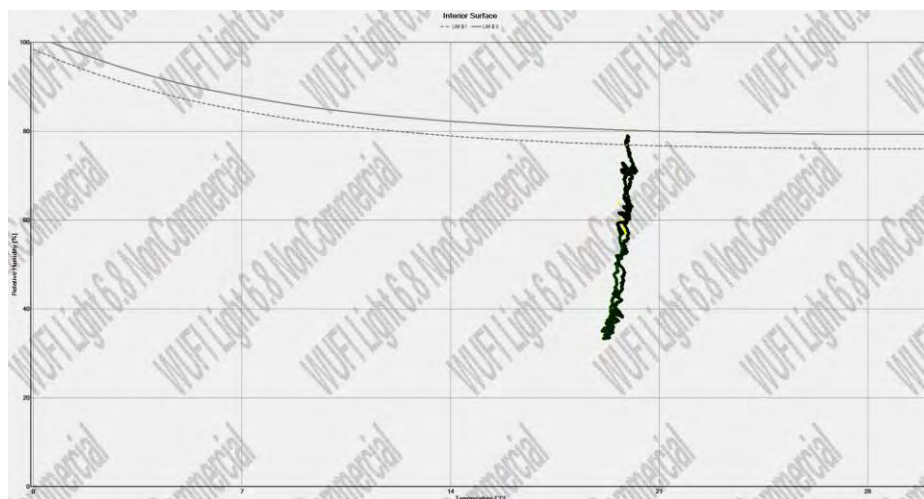


Slika 135. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i pametne parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta)

Nema pojave ljetnog kondenzata.



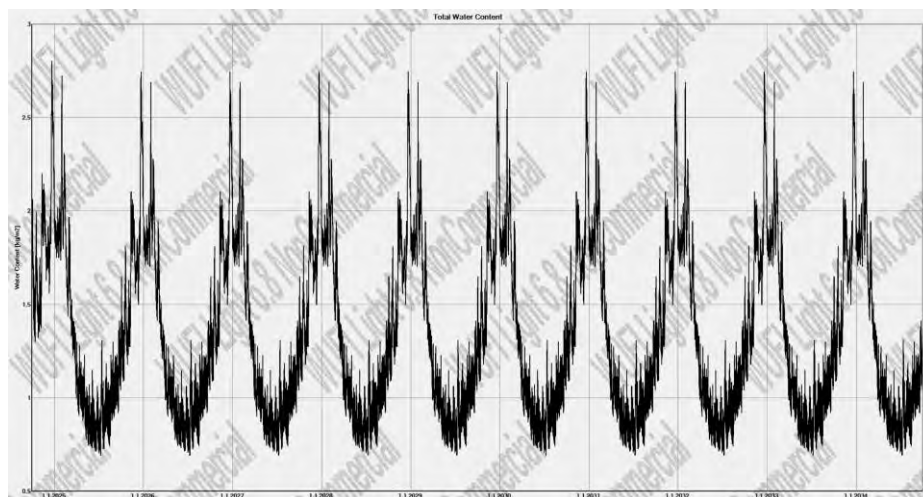
Slika 136. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta)



Slika 137. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz rog bez infiltracije)

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 137).

- Presjek kroz izolaciju

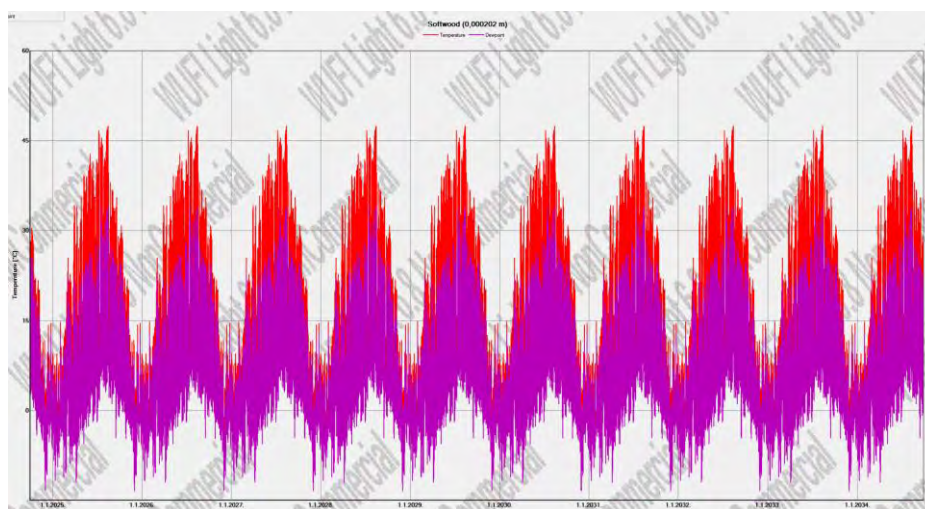


Slika 138. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ bez infiltracije (presjek kroz izolaciju)

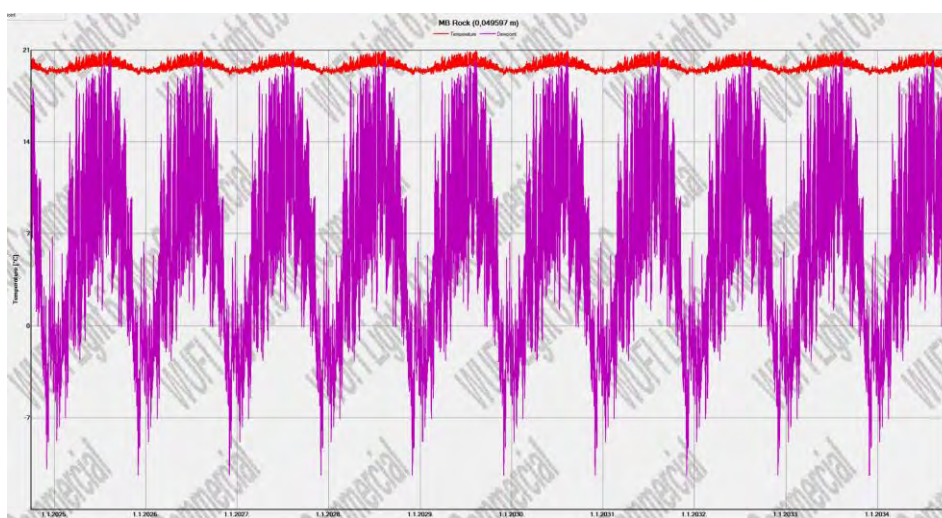
Tablica 44. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ bez infiltracije (presjek kroz izolaciju)

Water Content [kg/m ³]				
Layer/Material	Start	End	Min.	Max.
Solid Brick Masonry	18,00	9,54	0,80	87,75
Air Layer 30 mm	1,88	0,66	0,11	6,64
Weather resistant barrier (A)	0,00	0,00	0,00	0,01
Softwood	60,00	42,86	26,61	67,36
MB Rock	0,30	0,17	0,11	0,30
MB Rock	0,30	0,14	0,04	0,36
ISOVER Vario XtraSafe (till 2022)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gypsum Board	6,30	4,24	2,34	6,30
Interior Plaster (Gypsum Plaster)	6,30	4,26	2,33	6,30

Kao i u prethodnim slučajevima, presjek je cijelo proračunsko razdoblje u stanju dinamičke ravnoteže.

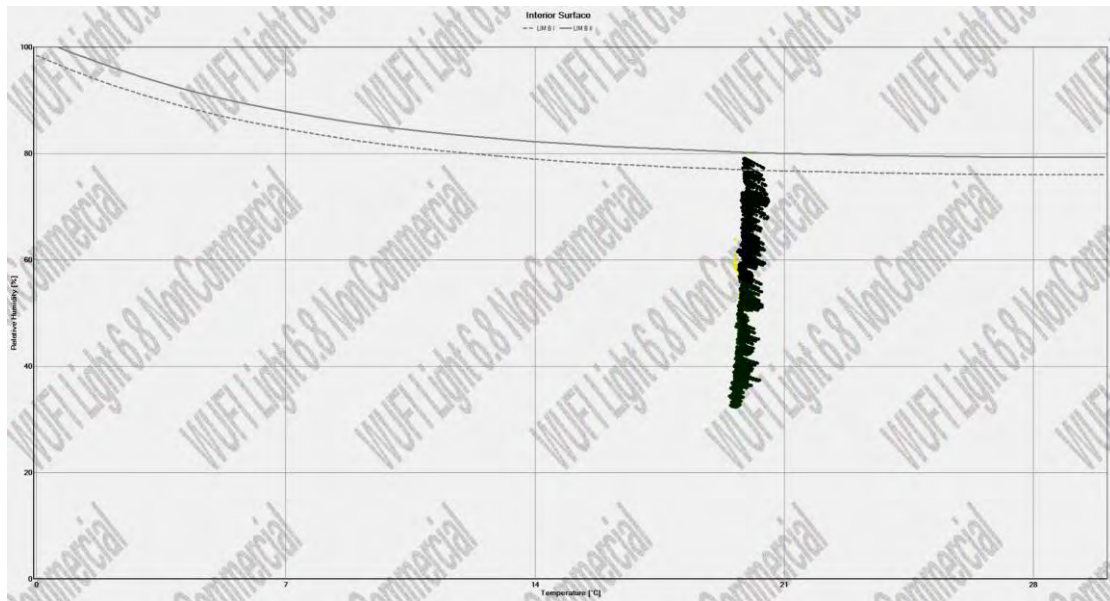


Slika 139. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplote i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto)



Slika 140. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto)

Što se tiče pojave ljetnog kondenzata, za slučaj proračuna krova bez infiltracije, pojava ljetnog kondenzata je minimalna. Usporedbom dijagrama koji prikazuju temperaturu kontaktne zone mineralne vune i parne brane i temperaturu rosišta za idealni slučaj bez infiltracije i slučaj s infiltracijom s parnom branom, uočava se značajna uloga pametne parne brane u prevenciji pojave kondenzacije.



Slika 14.1. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju bez infiltracije)

Higrotermalni uvjeti na unutarnjoj strani zida kao i na granicama slojeva ostaju ispod graničnih krivulja iznad kojih postoji rizik od razvoja gljivica i plijesni (Slika 14.1).

10. ZAKLJUČAK

Ubrzane klimatske promjene, zajedno s njihovim trenutačnim razornim posljedicama i mogućim još težim utjecajima u budućnosti, nameću potrebu za novim pristupom očuvanju okoliša i održivom razvoju. Kao odgovor na ovaj izazov, Europska unija, prepoznata kao ključni akter u globalnim promjenama, donosi novi zakonodavni okvir usmjeren na sprječavanje daljnjeg propadanja okoliša i usporavanje klimatskih promjena. Staklenički plinovi, koji su prema istraživanjima glavni uzrok klimatskih promjena, potječu u najvećoj mjeri iz sektora energetike. Upravo zbog toga, najvažnije promjene i najstroži zahtjevi usmjereni su prema sektoru zgradarstva.

Novi propisi u zgradarstvu prvenstveno se odnose na smanjenje toplinskih gubitaka u zgradama. Smanjenjem gubitaka, potreba za energijom se smanjuje. Stavlja se naglasak na upotrebu obnovljivih izvora energije za grijanje i hlađenje, što vodi prema standardu zgrada gotovo nulte energije. Ovi stroži energetske kriteriji primjenjuju se kako na nove, tako i na postojeće zgrade. Stoga, nove zgrade moraju biti projektirane tako da zadovolje standard gotovo nulte energije, dok postojeće zgrade zahtijevaju energetske obnovu kako bi se postigao taj cilj.

Zgradama koje zahtijevaju energetske obnovu pripadaju i zgrade zaštićene kao kulturna dobra u Republici Hrvatskoj. Takve zgrade zbog načina gradnje karakterističnog za razdoblje izgradnje najčešće spadaju u najlošiji energetske razred. Jedna od takvih zgrada je Zavičajni muzej Biograd na Moru, čijom se energetske obnovom bavi ovaj diplomski rad.

Za potrebe istraživanja korišteni su različiti programski paketi koji su značajno olakšali proces proračuna fizike zgrade. Izrađen je detaljan model zgrade koristeći BIM tehnologiju, a također su korišteni specijalizirani softveri za proračun energetske svojstava zgrade, proračune duljinskog koeficijenta prolaska topline i difuzije vodene pare. Sve je to učinjeno uz prethodno obrađenu teorijsku podlogu koja obuhvaća definiciju i zahtjeve za standard zgrada gotovo nulte energije.

Provedena je detaljna analiza postojećeg stanja zgrade, s opisom njezinih energetske svojstava i priloženim energetske certifikatom. Nakon toga su predložene konkretne mjere energetske obnove, pri čemu se vodilo računa o konzervatorske preporukama obzirom da se predmetna zgrada nalazi u kulturno – povijesnoj cjelini grada. Ranije opisanim mjerama energetske obnove postignute su značajne uštede u vidu primarne i isporučene potrebne energije za grijanje, hlađenje i rasvjetu uz korištenje obnovljivih izvora energije. Očuvan je izvorni izgled pročelja te gabariti zgrade zbog čega se zgrada toplinski izolirala s unutarnje strane te je ugrađen skriveni fotonapon na krov muzeja. Uvedena je mehanička ventilacija s

rekuperacijom topline. Proračuni su pokazali da se primjenom suvremenih tehnologija za očuvanje topline može smanjiti godišnja potrebna energija za grijanje do 76% i godišnja primarna energija do 72%.

Proveden je proračun toplinskih mostova na mjestima potencijalno povećanog toplinskog toka te je izračunat njihov utjecaj na toplinske gubitke i uspoređen s pretpostavljenim vrijednostima iz norme. Ispravno projektirani detalji su ključ su uredne raspodjele temperature po kritičnim presjecima, bez pojave alarmantnih toplinskih mostova.

Kako bi se provjerila vjerojatnost kondenzacije vodene pare na kritičnim građevnim dijelovima, proveden je i proračun difuzije vodene pare koristeći metodu proračuna preko HAM modela. Dobiveni rezultati prema prijedlogu energetske obnove su uredni ako uzmemo u obzir kako je proračun proveden s vanjskim klimatskim uvjetima za Innsbruck, a koji su nepovoljniji u odnosu na klimatske uvjete u Biogradu na Moru. Innsbruck ima veće količine padalina tijekom cijele godine, osobito u obliku snijega zimi; stoga su u provedenom proračunu uzeti u obzir veći rizik od vlage i kondenzacije. Biograd na Moru je bliže moru i odlikuju ga češći vjetrovi, posebno ljeti, što može poboljšati prirodnu ventilaciju.

Temeljem rezultata ovoga rada može se zaključiti da energetska obnova omogućuje značajne uštede u potrošnji energije, uz istovremeno očuvanje vizualnog identiteta i arhitektonskih vrijednosti zgrade koja je dio zaštićenog kulturnog dobra Republike Hrvatske. U skladu s navedenim, energetska obnovu zgrada u kulturno-povijesnim jezgrama gradova, kao i energetska obnovu kulturne baštine generalno, treba poticati i naglašavati jer rezultira boljitkom kako u vizualnom, funkcionalnom, tako i u energetskom i dugoročno financijskom smislu.

POPIS LITERATURE

- [1] Direktiva 2012/27/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 25. listopada 2012. o energetske učinkovitosti, izmjeni direktiva 2009/125/EZ i 2010/30/EU i stavljanju izvan snage direktiva 2004/8/EZ i 2006/32/EZ, Tekst značajan za EGP, 2012.
- [2] Ministarstvo kulture Republike Hrvatske, 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 svibnju 2024.)
- [3] Dugoročna strategija obnove nacionalnog fonda zgrada do 2050. godine, Zagreb, 2020.
- [4] Consilium: Energetska unija; Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/energy-union/> (pristupljeno u lipnju 2024.)
- [5] Ritchie, H., Rosado, P., Roser, M.: Energy: Our World Data; Dostupno na: <https://ourworldindata.org/energy> (pristupljeno u siječnju 2024.)
- [6] European Commission, Statistical Office of the European Union, Energy, transport and environment statistics - 2020 edition, 2020.
- [7] Pavić-Rogošić L.: Održivi razvoj, Odraž, 2010.
- [8] Održivi razvoj, Odraž, 2021. Dostupno na: <https://www.odraz.hr/nase-teme/odrzivi-razvoj/odrzivi-razvoj/> (pristupljeno u siječnju 2024.)
- [9] Zakon o energetske učinkovitosti - pročišćeni tekst, Narodne novine, br. 127/14, 116/18, 25/20, 32/21, 41/21
- [10] Has A.: Energetska učinkovitost kao potpora upravljanju zgradama javnog sektora, Ekonomski fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, doktorska disertacija, 2022.
- [11] Nacionalni portal energetske učinkovitosti: Ušteda energije u građevinama; Dostupno na: <https://www.enu.hr/gradani/info-edu/usteda-energije-u-zgradama/> (pristupljeno u lipnju 2024.)
- [12] Europska komisija, Preporuka komisije (EU) 2019/786 o obnovi zgrada, Službeni list Europske unije, 2019.

- [13] Pravilnik o energetsom pregledu zgrade i energetsom certificiranju – pročišćeni tekst, Narodne novine, br. 88/17, 90/20, 01/21, 45/21
- [14] Soldo V., Novak S., Horvat I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [15] Europski parlament, Klimatske promjene i staklenički plinovi koji uzrokuju globalno zagrijavanje; Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20230316STO77629/klimatske-promjene-i-staklenicki-plinovi-koji-uzrokuju-globalno-zagrijavanje> (pristupljeno u veljači 2024.)
- [16] Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Zgrade gotovo nulte energije nZEB; Dostupno na: <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu-15/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504> (pristupljeno u lipnju 2024.)
- [17] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, br. 128/2015
- [18] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, br. 70/2018
- [19] Milovanović, B., Bagarić, M.: Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije, Građevinar, 72 (2020) 8, pp. 703-720, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2923.2020>
- [20] Šimetin, V.: Građevinska fizika, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1983.
- [21] Schoeck Ltd., Thermal Bridging Guide, September 2018; Dostupno na: https://www.schoeck.co.uk/view/5993/Thermal_Bridging_Guide_Schoeck_Isokorb_%5B5993%5D.pdf (pristupljeno u lipnju 2024.)
- [22] Milovanović, B.: 7. predavanje - Toplinski mostovi, Građevinski fakultet, Zagreb; Dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/07._predavanje_-_toplinski_mostovi.pdf (pristupljeno u lipnju 2024.)
- [23] Što je RAL montaža i kako se izvodi?; Dostupno na: <https://www.trebam.hr/savjeti/stolarija-prozori/sto-je-ral-montaza-i-kako-se-izvodi> (pristupljeno u srpnju 2024.)
- [24] Ministarstvo kulture, Pravilnik o uvjetima za dobivanje dopuštenja za obavljanje poslova na zaštiti i očuvanju kulturnih dobara, Narodne novine, br. 98/2018

- [25] Zajednički informacijski sustav zemljišnih knjiga i katastra - javna aplikacija; Dostupno na: <https://oss.uredjenazemlja.hr/public-services/search-cad-parcel> (pristupljeno u svibnju 2024.)
- [26] Google Maps; Dostupno na: https://www.google.com/maps/place/ZAVI%C4%8CAJNI+MUZEJ+BIOGRAD+NA+MORU/@43.9379962,15.4375882,17z/data=!3m1!4m6!3m5!1s0x13334cac540fd0f2f:0x6a3ddd245da0b2e9!8m2!3d43.9379924!4d15.4401631!16s%2Fg%2F1td8nc02?entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MDkwNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D (pristupljeno u svibnju 2024.)
- [27] Registar Kulturnih Dobra; Dostupno na: <https://registar.kulturnadobra.hr/#/details/Z-4244> (pristupljeno u svibnju 2024.)
- [28] Turistička zajednica grada Biograda na Moru; Dostupno na: <https://www.discover-biograd.com/images/Muzej-001.jpg> (pristupljeno u svibnju 2024.)
- [29] Peulić, Đ.: Konstruktivni elementi zgrada, Croatiaknjiga, Zagreb, 2002.
- [30] Rendulić, D. I.: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama - pročišćeni tekst - (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, NN 102/20), ThoriumSoftware, 2020.
- [31] Prebeg, F., Horvat, I.: Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava rasvjete u zgradama, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [32] Andrassy, M., Balen, I., Boras, I., Dović, D., Has Borković, Ž. et al.: Priručnik za energetske certificiranje zgrada, Program Ujedinjenih naroda za razvoj - UNDP, Zagreb, 2010.
- [33] Priručnik za ROEFIX toplinsko-izolacijske sustave; Dostupno na: https://www.tera-umag.hr/PDF/Fasadni_sustavi/Rofix%20-%20Toplinsko-izolacijski%20Sustavi.pdf (pristupljeno u srpnju 2024.)
- [34] Galić, J., Galić, B.: Pojačanje stropova i zidanih zidova starih građevina, Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva, Opatija, 2011.
- [35] Toplinske pumpe; Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Toplinske_pumpe&oldid=6370230 (pristupljeno u kolovozu 2024.)
- [36] Daikin, Učinkovito grijanje s dizalicama topline; Dostupno na: https://www.daikin.hr/hr_hr/area-of-expertise/heating-and-heat-pumps.html (pristupljeno u kolovozu 2024.)

-
- [37] Crest Planum and PV Integrated Solar System; Dostupno na: <https://crest-bst.co.uk/solar-tiles/solinso-mystique-solar-tiles> (pristupljeno u srpnju 2024.)
- [38] Technology – Invisible Solar; Dostupno na: <https://www.invisiblesolar.it/EN/technology/> (pristupljeno u srpnju 2024.)
- [39] Koster Hrvatska, Određivanje točke rosišta i minimalne temperature primjene premaza na bazi reakcijskih smola; Dostupno na: https://www.koster.hr/files/hr_hr/6.0%20Tablica%20za%20odre%C4%91ivanje%20to%C4%8Dke%20rosi%C5%A1ta.pdf (pristupljeno u srpnju 2024.)
- [40] Ytong sustav gradnje, Toplinski mostovi; Dostupno na: https://www.arhitektika.hr/files/file/pdf/baza-proizvoda/ytong/Toplinski_mostovi.pdf (pristupljeno u kolovozu 2024.)
- [41.] Milovanović, B.: Toplinska ovojnica zgrade – problemi i rješenja u praksi, Hrvatsko društvo sudskih vještaka, Zagreb, 2012. pp. 37–43.
- [42] KI Expert Plus, programski paket; Dostupno na: <https://www.knaufinsulation.hr/preuzmite-dokumente/ki-expert-plus>
- [43] Fick's laws of diffusion; Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fick%27s_laws_of_diffusion&oldid=1235588853 (pristupljeno u kolovozu 2024.)
- [44] Alagušić, M., Banjad Pečur, I.: Analiza higrotermalnog ponašanja ovojnice zgrade od recikliranih betonskih elemenata, Zagreb, 2015.
- [45] Release of WUFI Pro® 6.0 | WUFI (en), programski paket; Dostupno na: <https://wufi.de/en/2016/04/19/wufi-pro-6-0-release/>
- [46] WUFI Pro 6 Manual; Dostupno na: https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/11/WUFIPro_6_manual.pdf (pristupljeno u kolovozu 2024.)
- [47] Kölsch, P.: Hygrothermal Simulation of ventilated pitched roofs with effective transfer parameters, Fraunhofer IBP, 2017.; Dostupno na: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/bb218b68-ff54-4ea6-a518-19fae49cb75a/content> (pristupljeno u kolovozu 2024.)
- [48] Ingebretsen, S. B., Andenæs, E., Kvande T.: Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates, Buildings, 2022.
- [49] VARIO sistemsko rješenje za svaki dom, SAINT-GOBAIN Hrvatska; Dostupno na: <https://www.saint-gobain.hr/clanci/isover/vario-sistemsko-rjesenje-za-svaki-dom> (pristupljeno u kolovozu 2024.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Ukupna potrošnja primarne energije u svijetu prema izvoru od 1800. do 2022. godine [5]	5
Slika 2. Tri sastavnice održivog razvoja [7].....	6
Slika 3. Shematski prikaz povećanog toplinskog toka zbog promjene materijala i geometrije građevnog dijela [21]	21
Slika 4. Prikaz ugradnje prozora u sloj toplinske izolacije (lijevo) i lošeg načina ugradnje prozora na nosivi dio zida bez prekrivanja okvira (desno) [22]	24
Slika 5. Shematski prikaz provedenog istraživanja	33
Slika 6. Izvod iz katastarskog plana [25].....	34
Slika 7. Lokacija zgrade [26].....	35
Slika 8. Izvadak iz Registra kulturnih dobara [27]	36
Slika 9. Jezgra Biograda na Moru [27]	37
Slika 10. Zavičajni muzej Biograd na Moru [28].....	38
Slika 11. Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [29]	39
Slika 12. Zona podijeljena na grijani prostor (crveno) i negrijani prostor (plavo)	40
Slika 13. Aksonometrijski prikaz modela Zavičajnog muzeja Biograd na Moru (Archicad)..	41
Slika 14. Detalj odabranog toplinskog mosta.....	43
Slika 15. Prozori muzeja bez zasjenjenja	45
Slika 16. Raspored otvora u prizemlju	46
Slika 17. Raspored otvora na prvom katu.....	46
Slika 18. Raspored otvora na drugom katu.....	47
Slika 19. Raspored otvora na tavanu	47
Slika 20. Strop prizemlja.....	55
Slika 21. Strop 1. kata.....	56
Slika 22. Strop 2. kata	56
Slika 23. Mjesečni toplinski gubici hlađenja $Q_{ht,C}$ (postojeće stanje).....	61
Slika 24. Mjesečni toplinski gubici grijanja $Q_{ht,H}$ (postojeće stanje)	61
Slika 25. Mjesečni dobici topline (postojeće stanje).....	62
Slika 26. Usporedba toplinskih gubitaka hlađenja, grijanja i toplinskih dobitaka (zeleno) (postojeće stanje).....	62
Slika 27. Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje (postojeće stanje).	63
Slika 28. Usporedba rezultata proračuna i zahtjeva iz Tehničkog propisa (postojeće stanje)	64

Slika 29. Isječak iz energetskeg certifikata (postojeće stanje)	65
Slika 30. Horizontalno sprezanje [34].....	71
Slika 31. Princip rada dizalice topline [36].....	73
Slika 32. Crvene solarne krovne pločice [37]	76
Slika 33. Primjer transparentnih krovnih solarnih pločica [38].....	77
Slika 34. Mjesečni toplinski gubici hlađenja Qht,C (rekonstrukcija).....	87
Slika 35. Mjesečni toplinski gubici grijanja, Qht,H (rekonstrukcija)	87
Slika 36. Mjesečni dobici topline (rekonstrukcija)	88
Slika 37. Usporedba toplinskih gubitaka hlađenja, grijanja i toplinskih dobitaka (rekonstrukcija)	88
Slika 38. Mjesečna raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje (rekonstrukcija)	89
Slika 39. Usporedba rezultata proračuna i zahtjeva iz Tehničkog propisa (rekonstrukcija)	89
Slika 40. Isječak iz energetskeg certifikata (rekonstrukcija)	90
Slika 41. Pozicije potencijalno povećanog toplinskog toka u ovojnici zgrade u tlocrtu	94
Slika 42. Pozicije potencijalno povećanog toplinskog toka u ovojnici zgrade u presjeku.....	95
Slika 43. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H1 u CRORAL-u.....	95
Slika 44. Temperaturni profil detalja H1.....	96
Slika 45. Detalj H1 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature.....	96
Slika 46. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H2 (1.-3. slučaj slijeva nadesno)..	97
Slika 47. Temperaturni profil detalja H2 (prvi slučaj)	98
Slika 48. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (prvi slučaj)	98
Slika 49. Temperaturni profil detalja H2 (drugi slučaj).....	99
Slika 50. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (drugi slučaj).....	99
Slika 51. Temperaturni profil detalja H2 (treći slučaj)	100
Slika 52. Detalj H2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (treći slučaj).....	101
Slika 53. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj H3 (1.-3. slučaj slijeva nadesno)	102
Slika 54. Temperaturni profil detalja H3 (prvi slučaj)	103
Slika 55. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (prvi slučaj)	103
Slika 56. Temperaturni profil detalja H3 (drugi slučaj).....	104
Slika 57. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (drugi slučaj).....	104
Slika 58. Temperaturni profil detalja H3 (treći slučaj)	105

Slika 59. Detalj H3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature (treći slučaj).....	106
Slika 60. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V1 u CRORAL-u.....	107
Slika 61. Temperaturni profil za detalj V1.....	108
Slika 62. Detalj V1 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature.....	108
Slika 63. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V2 u CRORAL-u.....	110
Slika 64. Temperaturni profil detalja V2.....	111
Slika 65. Detalj V2 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature.....	111
Slika 66. Grafički prikaz slojeva i rubnih uvjeta za detalj V3 u CRORAL-u.....	112
Slika 67. Temperaturni profil detalja V3.....	113
Slika 68. Detalj V3 i pripadajuće vrijednosti koeficijenata prolaska topline s minimalnim vrijednostima temperature.....	114
Slika 69. Kondenzacija u zidu prema Glaserovoj metodi.....	117
Slika 70. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice zgrade [44].....	118
Slika 71. Klimatski uvjeti u Innsbrucku (WUFI Light).....	119
Slika 72. Klasa vlažnosti 1 (EN ISO 13788).....	119
Slika 73. Svojstva unutarnjih i vanjskih površina promatranih elemenata (zid lijevo, krov desno).....	120
Slika 74. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (jugoistok).....	122
Slika 75. Ukupan sadržaj vlage u kamenu u vanjskom zidu (jugoistok).....	122
Slika 76. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na jugoistoku tijekom 5-godišnjeg razdoblja.....	122
Slika 77. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (jugozapad).....	123
Slika 78. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (jugozapad).....	123
Slika 79. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na jugozapadu tijekom 5-godišnjeg razdoblja.....	123
Slika 80. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (sjeveroistok).....	124
Slika 81. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (sjeveroistok).....	124
Slika 82. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeveroistoku tijekom 5-godišnjeg razdoblja.....	124
Slika 83. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu (sjeverozapad).....	125
Slika 84. Ukupan sadržaj vode u kamenu u vanjskom zidu (sjeverozapad).....	125
Slika 85. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeverozapadu tijekom 5-godišnjeg razdoblja.....	125

Slika 86. Ukupan sadržaj vlage u vanjskom zidu na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja.....	126
Slika 87. Ukupan sadržaj vlage u sloju kamena na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja.....	127
Slika 88. Ukupan sadržaj vode u hidrauličnom vapnenom špricu na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja.....	127
Slika 89. Rekapitulacija cirkulacije vlage za vanjski zid na sjeverozapadu tijekom 10-godišnjeg razdoblja.....	127
Slika 90. Odnos relativne vlažnosti (zeleno) i temperature tijekom vremena (crveno) za vanjsku površinu zida na sjeverozapadu.....	128
Slika 91. Odnos temperature unutarnje površine zida (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) tijekom vremena na sjeverozapadu.....	128
Slika 92. Odnos temperature kontaktne zone kamena i hidrauličnog vapnenog šprica i temperature rosišta zida na sjeverozapadu za 10-godišnje razdoblje ispitivanja.....	129
Slika 93. Izoplete za unutarnju površinu zida na sjeverozapadu	130
Slika 94. Izoplete za kritični sloj u zidu na sjeverozapadu	130
Slika 95. Izoplete za vanjsku površinu zida na sjeverozapadu	130
Slika 96. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	132
Slika 97. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	133
Slika 98. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	134
Slika 99. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	135
Slika 100. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	135
Slika 101. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	136
Slika 102. Izoplete za unutarnju stranu zida II (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija	136
Slika 103. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	137
Slika 104. Ukupan sadržaj vlage u krovu II s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	137
Slika 105. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplata i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	138

Slika 106. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	139
Slika 107. Izoplete za unutarnju stranu krova II (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	139
Slika 108. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	140
Slika 109. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	140
Slika 110. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija	141
Slika 111. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija	142
Slika 112. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija	142
Slika 113. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – projektirana rekonstrukcija.....	143
Slika 114. Izoplete za unutarnju stranu zida na sjeverozapadu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	143
Slika 115. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	144
Slika 116. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	144
Slika 117. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplata i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	145
Slika 118. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – projektirana rekonstrukcija	146
Slika 119. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	146
Slika 120. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz rog).....	147
Slika 121. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog s pametnom parnom branom).....	148
Slika 122. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije.....	149
Slika 123. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije.....	149

Slika 124. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i pametne parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije.....	150
Slika 125. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta) – za oba slučaja infiltracije.....	150
Slika 126. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom) – za oba slučaja infiltracije.....	150
Slika 127. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz izolaciju).....	151
Slika 128. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom).....	151
Slika 129. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplata i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – za oba slučaja infiltracije.....	152
Slika 130. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto) – za oba slučaja infiltracije.....	153
Slika 131. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom) – za oba slučaja infiltracije.....	153
Slika 132. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ bez infiltracije (presjek kroz rog).....	154
Slika 133. Prikaz temperature kontaktne zone krovne folije i daščane oplata (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta).....	154
Slika 134. Prikaz temperature kontaktne zone drvenog grednika i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta).....	155
Slika 135. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i pametne parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta).....	155
Slika 136. Prikaz temperature unutarnje strane krova (crveno) i temperature rosišta (ljubičasta).....	155
Slika 137. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz rog bez infiltracije).....	156
Slika 138. Ukupan sadržaj vlage u krovu SZ bez infiltracije (presjek kroz izolaciju).....	156
Slika 139. Prikaz temperature kontaktne zone daščane oplata i mineralne vune (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto).....	157
Slika 140. Prikaz temperature kontaktne zone mineralne vune i parne brane (crveno) i temperature rosišta (ljubičasto).....	157
Slika 141. Izoplete za unutarnju stranu krova na sjeverozapadu (presjek kroz izolaciju bez infiltracije).....	158

POPIS TABLICA

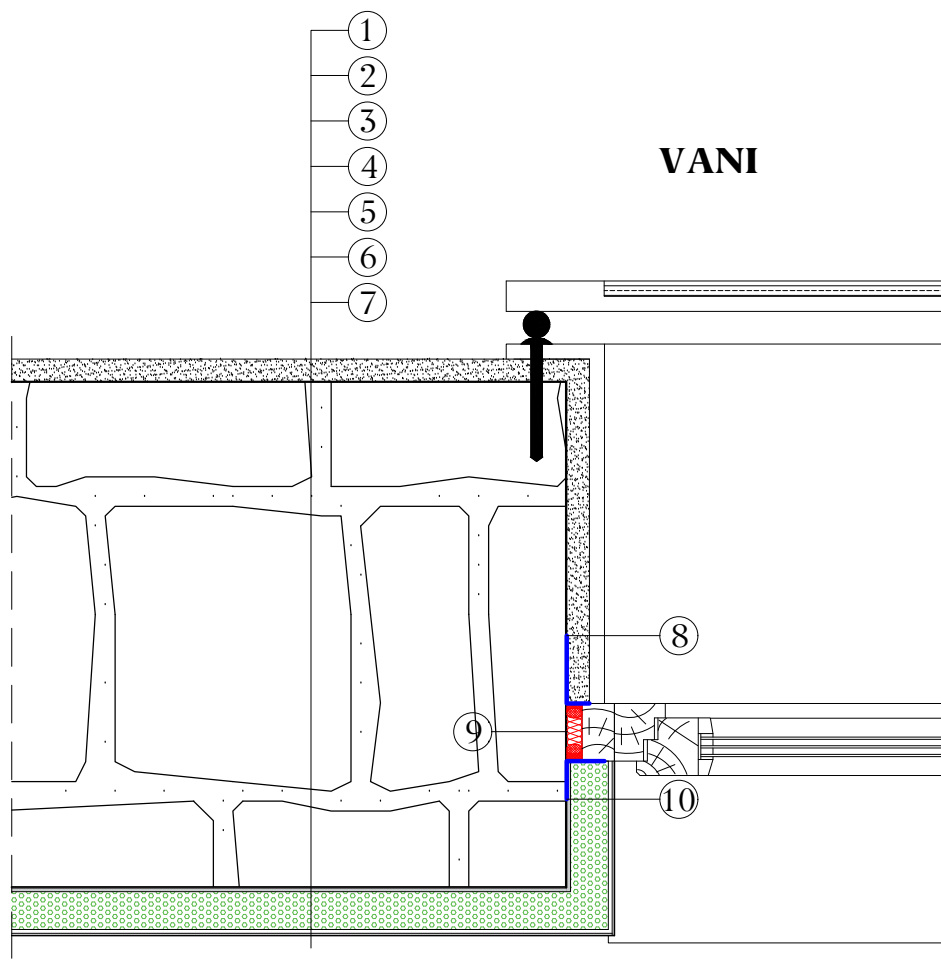
Tablica 1. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje za referentne klimatske podatke [13].....	11
Tablica 2. Specifična godišnja primarna energija, E_{prim} izražena u kWh/m ² a [13]	12
Tablica 3. Najveće dopuštene vrijednosti za nove zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hlađene na temperaturu 18°C ili više [17].....	15
Tablica 4. Najveće dopuštene vrijednosti za postojeće grijane i/ili hlađene zgrade na temperaturu 18°C ili više prilikom rekonstrukcije [17]	15
Tablica 5. Definirani tehnički sustavi za proračun isporučene i primarne energije [18]	16
Tablica 6. Geometrijske karakteristike zgrade (prema 3D modelu)	42
Tablica 7. Klimatski podaci za referentnu meteorološku postaju.....	42
Tablica 8. Karakteristični koeficijenti prolaska topline za različite vremenske periode i određene karakteristike otvora [32]	45
Tablica 9. Popis i karakteristike otvora (postojeće stanje).....	48
Tablica 10. Usporedba rezultata proračuna koeficijenta prolaska topline s maksimalno dopuštenim vrijednostima.....	59
Tablica 11. Transmisijski koeficijent izmjene topline	60
Tablica 12. Ukupni godišnji toplinski gubici grijanja i hlađenja (postojeće stanje).....	61
Tablica 13. Toplinski dobici	62
Tablica 14. Popis otvora i pripadajućih karakteristika (rekonstrukcija)	79
Tablica 15. Usporedba rezultata proračuna koeficijenta prolaska topline s maksimalno dopuštenim vrijednostima (rekonstrukcija).....	86
Tablica 16. Transmisijski koeficijent izmjene topline (rekonstrukcija).....	86
Tablica 17. Toplinski dobici (rekonstrukcija).....	87
Tablica 18. Tablica za određivanje točke rošenja prema Mollierovom dijagramu [39]	93
Tablica 19. Slojevi za detalj H1 u CRORAL-u	95
Tablica 20. Rubni uvjeti za detalj H1 u CRORAL-u	96
Tablica 21. Slojevi za detalj V2 u CRORAL-u.....	97
Tablica 22. Rubni uvjeti za detalj V2 u CRORAL-u.....	98
Tablica 23. Slojevi za detalj H3 u CRORAL-u	102
Tablica 24- Rubni uvjeti za detalj H3 u CRORAL-u	102
Tablica 25. Slojevi za detalj V1 u CRORAL-u.....	107
Tablica 26. Rubni uvjeti za detalj V3 u CRORAL-u.....	107
Tablica 27. Slojevi za detalj V2 u CRORAL-u.....	110

Tablica 28. Rubni uvjeti za detalj V2 u CRORAL-u.....	110
Tablica 29. Slojevi za detalj V3 u CRORAL-u.....	113
Tablica 30. Rubni uvjeti za detalj V3 u CRORAL-u.....	113
Tablica 31. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	133
Tablica 32. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	133
Tablica 33. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	137
Tablica 34. Sadržaj vlage u slojevima krova JI s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	138
Tablica 35. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	140
Tablica 36. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog) – projektirana rekonstrukcija.....	141
Tablica 37. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz parnu branu (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	144
Tablica 38. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju) – projektirana rekonstrukcija.....	145
Tablica 39. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz rog).....	148
Tablica 40. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz rog s pametnom parnom branom)	148
Tablica 41. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz pametnu parnu branu (presjek kroz izolaciju)	151
Tablica 42. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ s infiltracijom kroz krovnu foliju (presjek kroz izolaciju s pametnom parnom branom)	152
Tablica 43. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ bez infiltracije (presjek kroz rog)	154
Tablica 44. Sadržaj vlage u slojevima krova SZ bez infiltracije (presjek kroz izolaciju).....	156

PRILOG 1

Sadržaj priloga 1:

1. Detalj H1
2. Detalj H2
3. Detalj H3
4. Detalj V1
5. Detalj V2
6. Detalj V3



- 1 vapneno-cementna žbuka
 2 prirodni kamen 67 cm
 3 impregnacijski premaz
 4 hidraulični-vapneni špric 0,5 cm
 5 aerogel žbuka 5 cm
 6 polimer-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom 0,5 cm
 7 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm
 8 paropropusna-vodonepropusna folija
 9 PUR pjena
 10 paronepropusna-vodonepropusna folija

GRIJANO

DETALJ H1

OBJEKT:

Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja
 Biograd na Moru

SADRŽAJ:

Horizontalni spoj
 nosivog kamenog zida i drvenog prozora

DATUM:

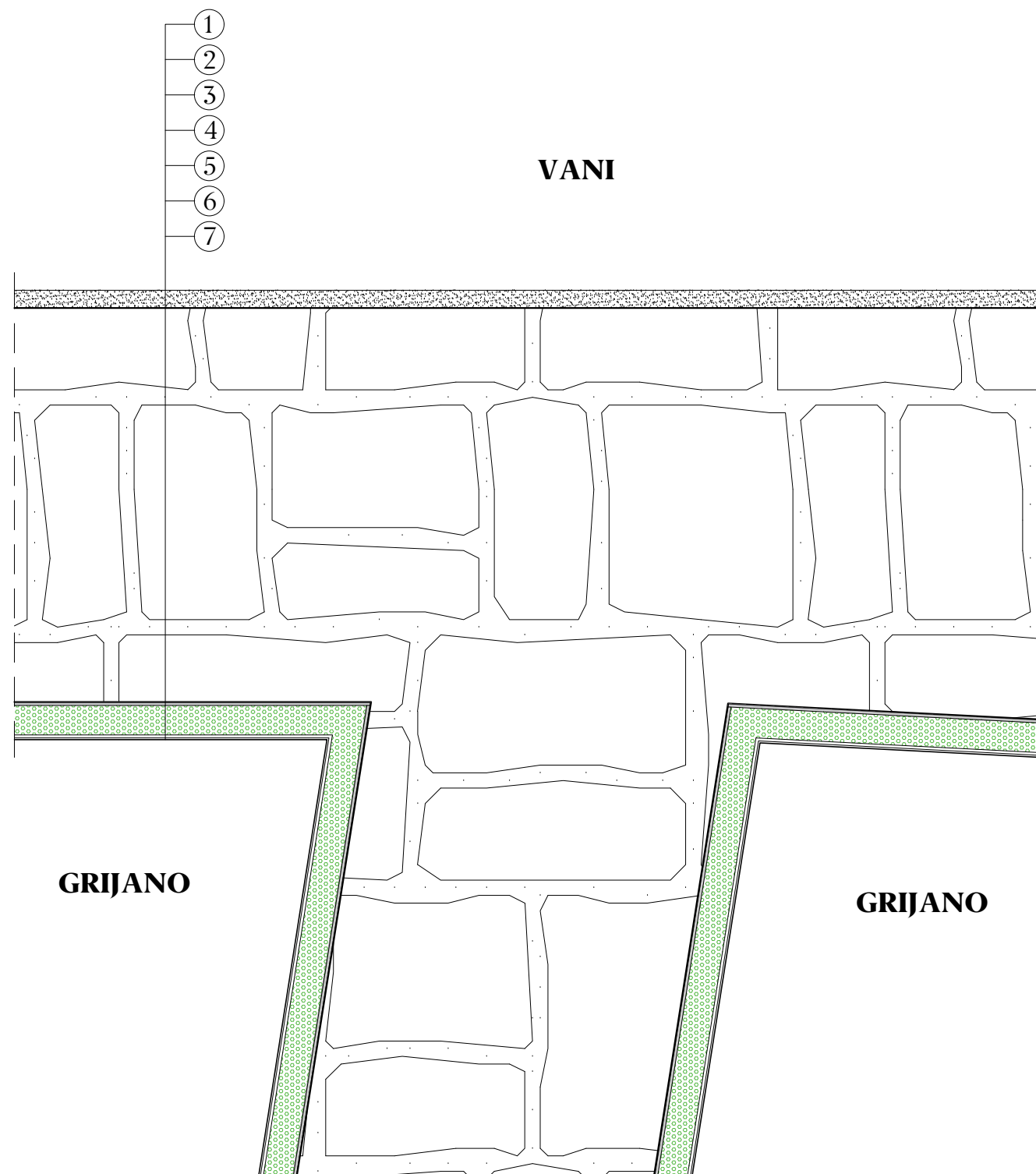
20.5.2024.

MJERILO:

1:10

LIST:

01



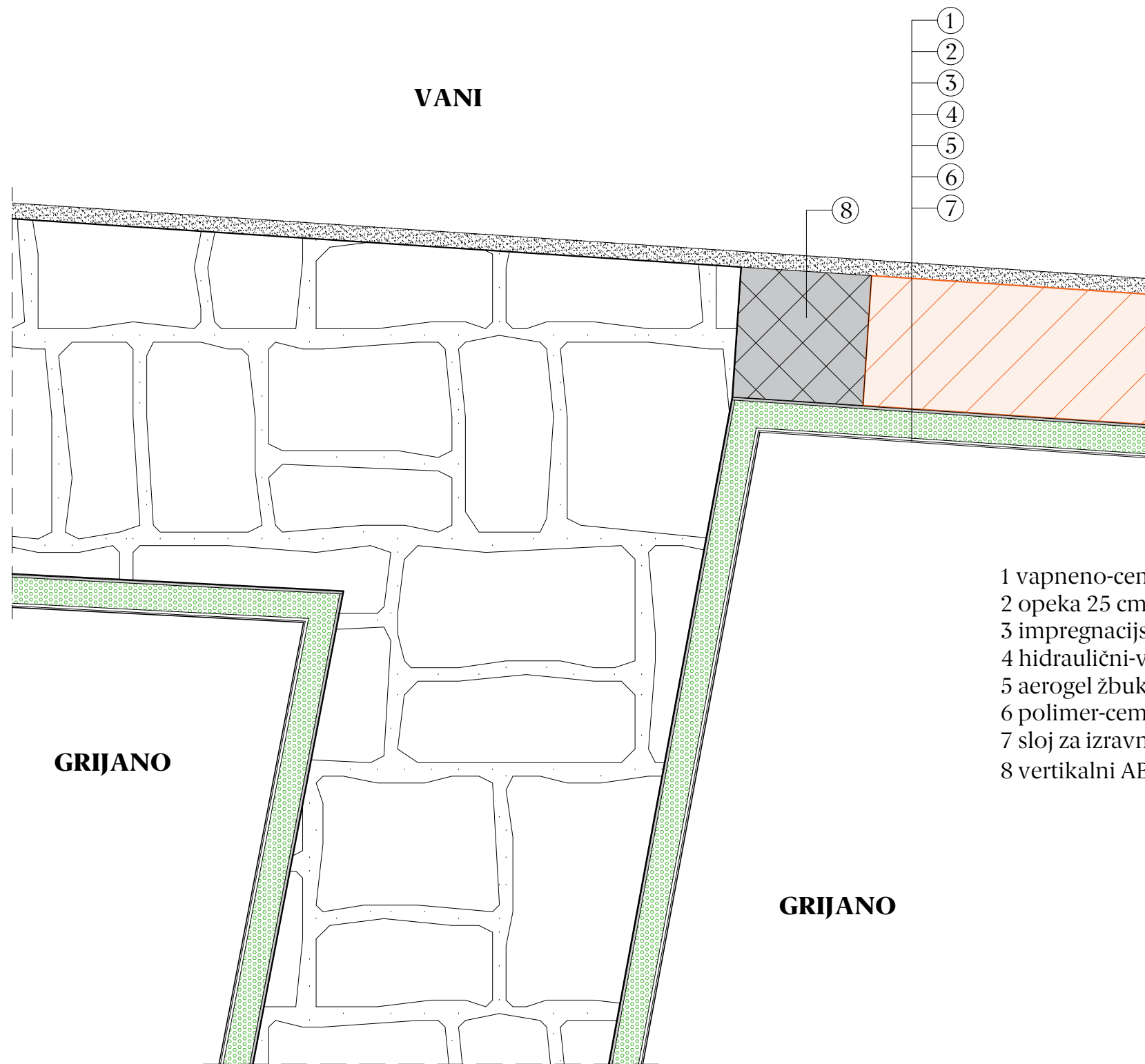
- 1 vapneno-cementna žbuka
- 2 prirodni kamen 67 cm
- 3 impregnacijski premaz
- 4 hidraulični-vapneni špric 0,5 cm
- 5 aerogel žbuka 5 cm
- 6 polimer-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom 0,5 cm
- 7 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm

DETALJ H2

OBJEKT:
Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja
Biograd na Moru

SADRŽAJ:
Horizontalni spoj
nosivih kamenih zidova

DATUM:	MJERILO:	LIST:
20.5.2024.	1:10	01



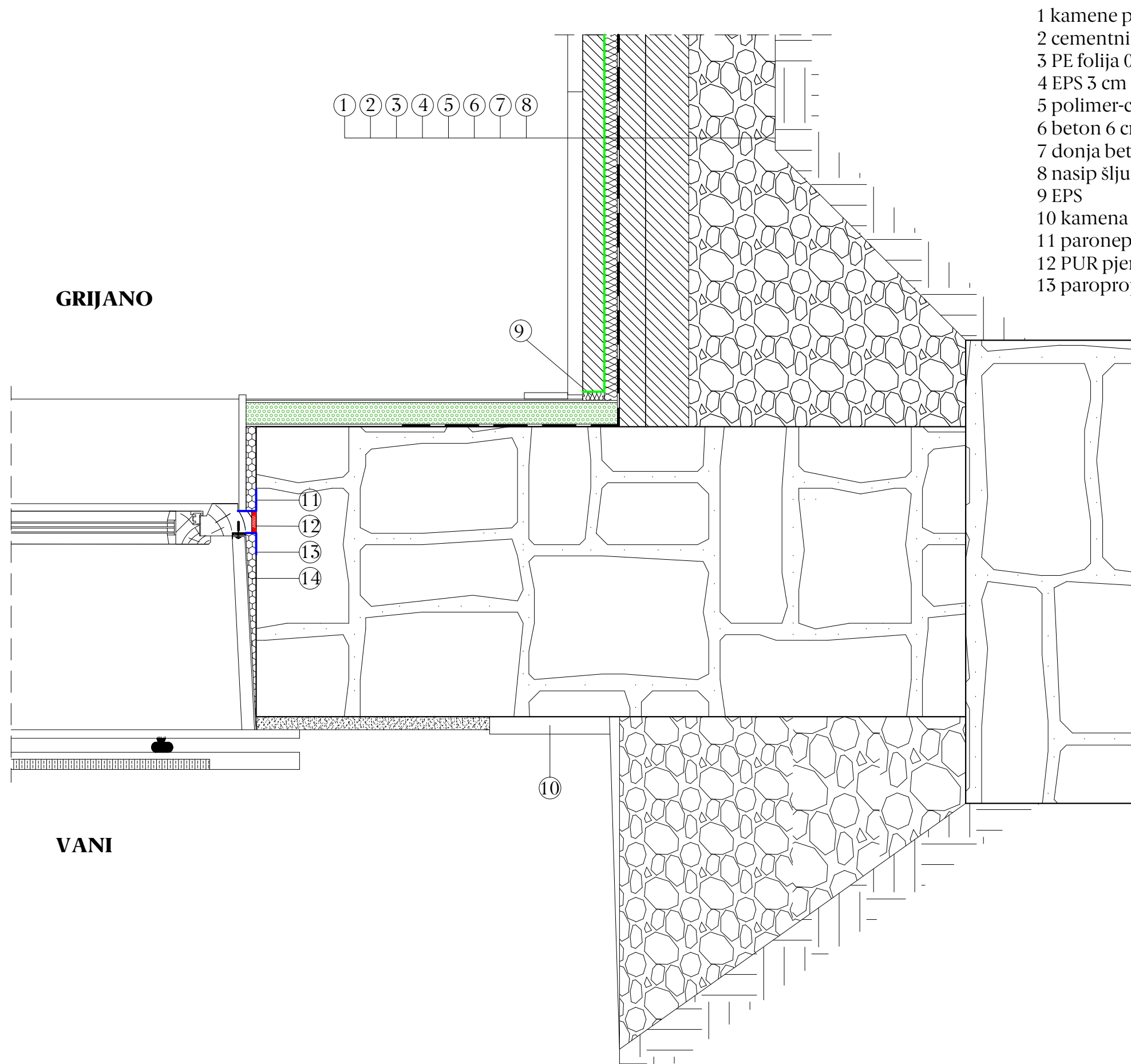
- 1 vapneno-cementna žbuka
- 2 opeka 25 cm
- 3 impregnacijski premaz
- 4 hidraulični-vapneni špric 0,5 cm
- 5 aerogel žbuka 5 cm
- 6 polimer-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom 0,5 cm
- 7 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm
- 8 vertikalni AB serklaž $2\frac{5}{25}$ cm

DETALJ H3

OBJEKT:
Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja
Biograd na Moru

SADRŽAJ:
Horizontalni spoj
kamenih zidova i zida od opeke

DATUM:	MJERILO:	LIST:
20.5.2024.	1:10	01

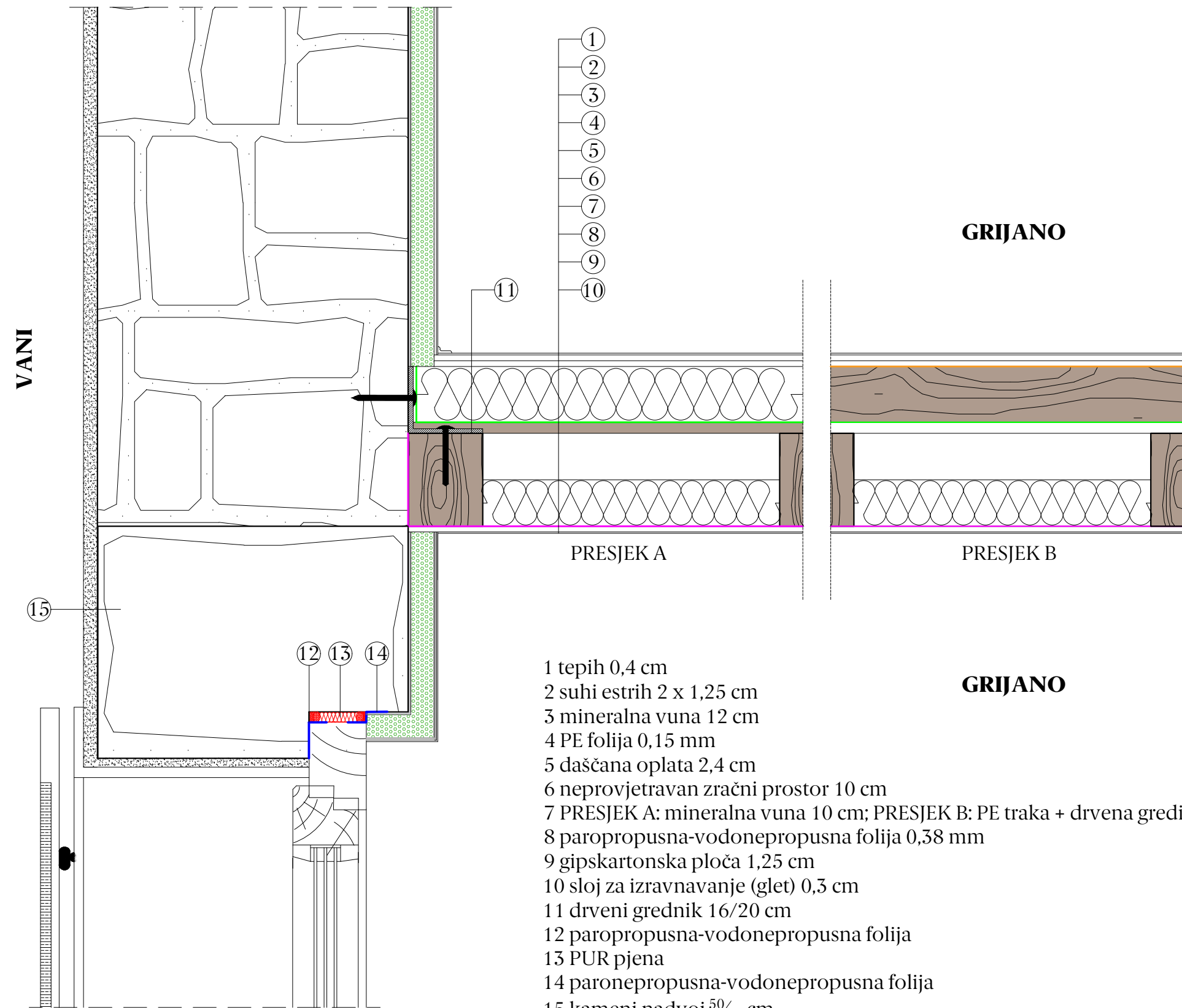


- 1 kamene ploče 3,5 cm
- 2 cementni estrih 5 cm
- 3 PE folija 0,25 mm
- 4 EPS 3 cm
- 5 polimer-cementni hidroizolacijski premaz 0,4 cm
- 6 beton 6 cm
- 7 donja betonska podloga 10 cm
- 8 nasip šljunka 20 cm
- 9 EPS
- 10 kamena ploča 3 cm
- 11 paronepropusna-vodonepropusna folija
- 12 PUR pjena
- 13 paropropusna-vodonepropusna folija

GRIJANO

VANI

DETALJ V1		
OBJEKT: Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja Biograd na Moru		
SADRŽAJ: Vertikalni spoj podne ploče na tlu i nosivog kamenog zida		
DATUM: 20.5.2024.	MJERILO: 1:10	LIST: 01



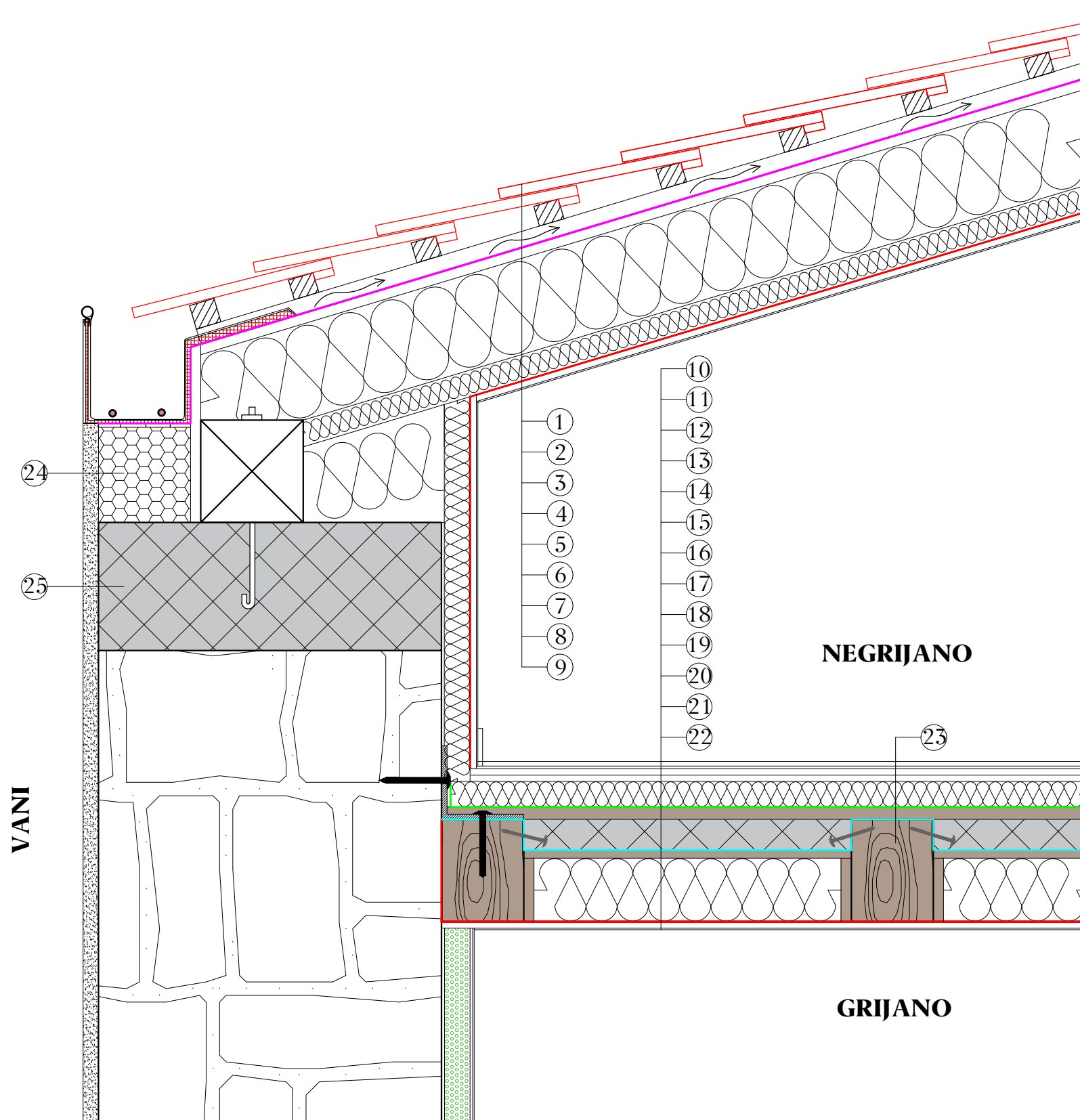
- 1 tepih 0,4 cm
- 2 suhi estrih 2 x 1,25 cm
- 3 mineralna vuna 12 cm
- 4 PE folija 0,15 mm
- 5 daščana oplata 2,4 cm
- 6 neprovjetravan zračni prostor 10 cm
- 7 PRESJEK A: mineralna vuna 10 cm; PRESJEK B: PE traka + drvena gredica 10 cm
- 8 paropropusna-vodonepropusna folija 0,38 mm
- 9 gipskartonska ploča 1,25 cm
- 10 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm
- 11 drveni grednik 16/20 cm
- 12 paropropusna-vodonepropusna folija
- 13 PUR pjena
- 14 paronepropusna-vodonepropusna folija
- 15 kameni nadvoj $\frac{50}{67}$ cm

DETALJ V2

OBJEKT:
Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja
Biograd na Moru

SADRŽAJ:
Vertikalni spoj kamenog zida i
međukatne konstrukcije (GG)

DATUM:	MJERILO:	LIST:
20.5.2024.	1:10	01



- 1 krovni crijep 1,5 cm
- 2 zračni prostor (prečna letva + kontra letva) 3 cm
- 3 paropropusna-vodonepropusna folija 0,5 mm
- 4 daščana oplata 2 cm
- 5 mineralna vuna 18 cm/drveni rogovi 18/18 cm
- 6 mineralna vuna 5 cm
- 7 parna brana 0,2 mm
- 8 gipskartonska ploča 1,25 cm
- 9 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm
- 10 keramičke pločice 0,9 cm
- 11 polimer-cementno ljepilo 0,3 cm
- 12 suhi estrih 2 x 1,25 cm
- 13 PE folija 0,15 mm
- 14 mineralna vuna 5 cm
- 15 daščana oplata 2,4 cm
- 16 armirani beton 6 cm
- 17 PE folija 0,15 mm
- 18 OSB 2 cm
- 19 mineralna vuna 12 cm
- 20 parna brana 0,2 mm
- 21 gipskartonska ploča 1,25 cm
- 22 sloj za izravnavanje (glet) 0,3 cm
- 23 drveni grednik 16/20 cm
- 24 XPS
- 25 horizontalni AB serklaž $2\frac{4}{67}$ cm

DETALJ V3

OBJEKT:

Rekonstrukcija Zavičajnog muzeja
Biograd na Moru

SADRŽAJ:

Vertikalni spoj krova, vanjskog kamenog
zida i međukatne konstrukcije (GN)

DATUM:

20.5.2024.

MJERILO:

1:10

LIST:

01