

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO

Ljubljana, 2018

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE STAVBARSTVO**

Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	699.86:727(497.4)(043.3)
Avtor:	Aljaž Petrič
Mentor:	izr. prof. dr. Roman Kunič
Somentor:	mag. Boštjan Furlan
Naslov:	Celostna energijska sanacija stavbe Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	62 str., 30 pregl., 43 sl.
Ključne besede:	konstrukcijska gradbena fizika, energijska sanacija, celostna sanacija, energetska učinkovitost, osvetljenost, osončenost, parametrične analize

Izvilleček

V magistrskem delu obravnavamo celostno energijsko sanacijo stavbe Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina. Obstoječa stavba ni energetska učinkovita, zato ob upoštevanju načel stavbarstva načrtujemo celostno sanacijo, s katero zagotovimo ustrezno toplotno izolacijo, hidroizolacijo in zvočno izolacijo stavbe ter preverimo osvetljenost izbranih prostorov z dnevno svetlobo. Najprej smo objekt temeljito pregledali in ocenili obstoječe stanje samega objekta, kot tudi stanje vgrajenih elementov in materialov. Potem smo preverili njihovo ustreznost glede na trenutno veljavno zakonodajo in identificirali kritične elemente, ki so potrebni sanacije. Podatke o geometriji in materialih v stavbi smo pridobili iz dokumentacije projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja, dodatnih načrtov in na podlagi pregleda objekta, za analizo posameznih elementov pa smo uporabili programa KI Energija 2014 in Hrup'13. Izvedli smo analizo akustike notranjega okolja dveh prostorov s programom ARTIE. V nadaljevanju smo izvedli analizo klimatskih danosti lokacije, naredili smo parametrično analizo toplotne prehodnosti toplotnega ovoja in nato zasnovali zaščitne konstrukcije ter konstrukcijske sklope, ki sedaj izpolnjujejo vse zahteve. Pri zasnovi transparentnih površin na strehi smo s programom Velux Daylight Visualizer analizirali vpliv teh površin na osvetljenost izbranih prostorov z dnevno svetlobo. V zadnjem delu smo izvedli še analizo gradbene fizike načrtovanega stanja v programu KI Energija 2014 in preverili kazalce energetske učinkovitosti stavbe. Na koncu smo rezultate komentirali in predlagali dodatne ukrepe, ki bi energetska učinkovitost stavbe še izboljšali.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 699.86:727(497.4)(043.3)
Author: Aljaž Petrič
Supervisor: Prof. Roman Kunič, Ph.D.
Co-supervisor: Boštjan Furlan, M.Sc.
Title: Holistic energy rehabilitation of the Veno Pilon Ajdovščina Secondary School building
Document type: Master Thesis
Notes: 62 p., 30 tab., 43 fig.
Key words: Building physics, energy rehabilitation, holistic rehabilitation, energy efficiency, illumination, solar irradiation, parametric analysis

Abstract

The subject of this master thesis is a holistic energy rehabilitation of the building of the Veno Pilon Ajdovščina Secondary School. In accordance with the key principles of building, our renovation plan proposes a sufficient thermal and sound insulation, waterproofing of the building and daylight illumination inspection of some of the chosen areas. The first step was a thorough examination of the building and the evaluation of the current state of the building and its inbuilt elements and materials. Furthermore, we checked their relevance according to the current legislation and identified the critical elements that had to be rehabilitated or upgraded. The KI Energija 2014 and the Hrup'13 programs were used for the analysis of the individual elements. An analysis of the reverberation time of indoor environment was calculated for two spaces with the ARTIE software. Afterward, we analysed the climate conditions of the location and also performed a parametric study of the heat transfer coefficient of the building envelope. Appropriate structural assemblies that now meet the requirements were designed as well. Designing the transparent surfaces of the roof, we used the Velux Daylight Visualizer software to analyse the effect these surfaces have on the internal illumination of the selected spaces. Lastly, we performed an analysis of the energy efficiency and the energy consumption with the use of the KI Energija 2014 software. At the end, we presented the results, commented on them and added some additional propositions to further improve the energy efficiency of the building.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Romanu Kuniču in somentorju mag. Boštjanu Furlanu za usmerjanje, pomoč in strokovno svetovanje pri izdelavi magistrskega dela. Hvala tudi ostalim članom Katedre za stavbe in konstrukcijske elemente za pridobljeno znanje v času magistrskega študija.

Zahvaljujem se tudi družini, puncu in prijateljem za spodbudo in pomoč v času študija in pri pisanju magistrskega dela.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
KAZALO VSEBINE	IX
KAZALO SLIK	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
OKRAJŠAVE	XIV
SIMBOLI	XV
1 UVOD	1
2 PREGLED IN ANALIZA TRENUTNEGA STANJA	3
2.1 Pravilniki in zahteve	3
2.2 Opis stavbe	3
2.3 Pregled in opis splošnega stanja stavbe, konstrukcijskih sklopov in zaščitnih konstrukcij	8
2.3.1 Stanje zaščitnih konstrukcij in konstrukcijskih sklopov	8
2.3.2 Stanje transparentnega dela stavbnega ovoja in preostalega stavbnega pohištva	17
3 ANALIZA AKUSTIKE NOTRANJEGA OKOLJA	22
3.1 Tipična učilnica	22
3.2 Amfiteatralna predavalnica	25
4 CELOSTNA ENERGIJSKA SANACIJA	29
4.1 Opis in analiza klimatskih danosti lokacije objekta	29
4.1.1 Lokacija	29
4.1.2 Bioklimatske danosti	29
4.2 Parametrična analiza U-faktorja toplotnega ovoja in debeline dodatne izolacije ...	32
4.3 Zasnova zaščitnih konstrukcij in konstrukcijskih sklopov	36
4.3.1 Tla na terenu	37
4.3.2 Stena proti terenu	37
4.3.3 Zunanja stena in tla nad zunanjim zrakom	38
4.3.4 Streha	40
4.3.5 Notranje delitve	41
4.4 Zasnova transparentnih površin	41
4.4.1 Zunanja okna na fasadnih površinah	41

4.4.2	Pokriti atrij.....	42
4.4.3	Svetlobne kupole nad knjižnico.....	47
5	ANALIZA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI	50
5.1	Določitev toplotnih con.....	50
5.2	Zunanje konstrukcije.....	51
5.3	Toplotni mostovi	52
5.4	Notranje konstrukcije	52
5.5	Sistemi	52
5.6	Rezultati	53
5.7	Potencialni dodatni ukrepi za doseganje večje energetske učinkovitosti.....	55
6	ZAKLJUČEK	58
VIRI		60

KAZALO SLIK

Slika 1: Obravnavana stavba Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina z okolico, fotografirana iz zraka (Občina Ajdovščina, 2017)	4
Slika 2: Tloris kleti (načrt ni v merilu).....	5
Slika 3: Tloris pritličja (načrt ni v merilu).....	6
Slika 4: Tloris nadstropja (načrt ni v merilu)	7
Slika 5: Zunanja stena 1 – Fasada s trapezno pločevino	12
Slika 6: Zunanja stena 2 – Kontaktno izolacijska tankoslojna fasada	13
Slika 7: Zunanja stena 2 – Vegetacija na severni strani površine fasade	13
Slika 8: Zastekljene površine na severozahodni strani	18
Slika 9: Streha nad atrijem iz notranjosti	19
Slika 10: Ena od štirih svetlobnih kupol nad čitalnico z opaznimi znaki puščanja na ometu .	20
Slika 11: Tipična notranja vrata z nadsvetlobo v obravnavani stavbi	20
Slika 12: Vrata na prehodu iz objekta šole na povezovalni hodnik in večnamensko športno dvorano.....	21
Slika 13: Oprema tipične učilnice	23
Grafikon 14: Rezultati analize odmevnega časa v tipični učilnici v programu ARTIE (30 ljudi)	24
Grafikon 15: Rezultati analize odmevnega časa v tipični učilnici v programu ARTIE (15 ljudi)	25
Slika 16: Del notranjosti amfiteatralne predavalnice	26
Slika 17: Del notranjosti amfiteatralne predavalnice z nameščenimi akustičnimi ploščami ...	26
Grafikon 18: Rezultati analize odmevnega časa v amfiteatralni predavalnici v programu ARTIE	27
Grafikon 19: Rezultati analize odmevnega časa v amfiteatralni predavalnici pred izvedeno akustično sanacijo	28
Slika 20: Makro in mikro lokacija objekta.....	29
Slika 21: Površine stavbe obarvane glede na orientacijo: rdeča – JV, modra – JZ, rumena – SV, zelena – SZ, svetlo modra – streha.....	31
Slika 22: Primer prikaza rezultatov osončenosti zunanjih površin objekta za 21. 12.....	32
Grafikon 23: Graf parametrične analize $Q_{NH}(U_{nettransparentnega\ ovoja})$	33
Grafikon 24: Graf parametrične analize $Q_{NC}(U_{nettransparentnega\ ovoja})$	34
Grafikon 25: Graf parametrične analize $Q_{NH}(d_{dod.izo.})$	35
Grafikon 26: Graf parametrične analize $Q_{NC}(d_{dod.izo.})$	36
Slika 27: Zasnova konstrukcijskega sklopa zunanje stene proti terenu	37
Slika 28: Zasnove konstrukcijskih sklopov zunanje stene in tal nad zunanjim zrakom.....	39

Slika 29: Zasnova konstrukcijskega sklopa strehe	40
Slika 30: Primer nadometne namestitve škatle zunanjih žaluzij (Roltek, 2018).....	42
Slika 31: SketchUp model za analizo v programu Velux Daylight Visualizer 3.....	43
Slika 32: Primerjava analiz KDS v nadstropju	44
Slika 33: Primerjava analiz KDS na medetaži	44
Slika 34: Primerjava analiz dnevne osvetljenosti v ekstremnem primeru v nadstropju.....	45
Slika 35: Primerjava analiz dnevne osvetljenosti v ekstremnem primeru na medetaži.....	45
Slika 36: Vizualizacija osvetljenosti atrija z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)	46
Slika 37: Vizualizacija osvetljenosti hodnika z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)	47
Slika 38: Prosojna kupola nad strešnim oknom za ravno streho (Velux, 2017).....	48
Slika 39: Primerjava analiz KDS na medetaži	48
Slika 40: Vizualizacija osvetljenosti knjižnice in čitalnice z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)	49
Grafikon 41: Potrebna dovedena energija po predlagani prenovi stavbe.....	54
Grafikon 42: Deleži potrebne dovedene energije po predlagani prenovi stavbe	55
Slika 43: Primer svetlobne police (Arcadia, 2018)	56

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: KS tla na terenu 1.....	9
Preglednica 2: KS tla na terenu 2 (strojnica).....	9
Preglednica 3: KS tla na terenu 3 (amfiteatralna predavalnica).....	10
Preglednica 4: KS tla nad zunanjim zrakom.....	10
Preglednica 5: Rezultati analize zvočne izolirnosti obstoječe tal nad zunanjim zrakom.....	11
Preglednica 6: KS stena proti terenu 1.....	11
Preglednica 7: KS stena proti terenu 2.....	11
Preglednica 8: KS zunanja stena 1	12
Preglednica 9: KS zunanja stena 2	12
Preglednica 10: Rezultati analize zvočne izolirnosti obstoječe zunanje stene	14
Preglednica 11: KS streha	14
Preglednica 12: Nosilna AB stena.....	14
Preglednica 13: Rezultati analize zvočne izolirnosti za AB steno med dvema učilnicama	15
Preglednica 14: Rezultati analize zvočne izolirnosti za AB steno med učilnico in hodnikom.	15
Preglednica 15: Predelna opečna stena	15
Preglednica 16: Rezultati zvočne izolirnosti za opečnato steno med kabinetom in hodnikom	15
Preglednica 17: Medetažna konstrukcija učilnice, kabineti in hodniki	16
Preglednica 18: Rezultati analize zvočne izolirnosti za medetažno konstrukcijo med učilnico in hrupno učilnico.....	16
Preglednica 19: Medetažna konstrukcija sanitarije.....	16
Preglednica 20: Medetažna konstrukcija atrij	17
Preglednica 21: Ekvivalentna absorpcijska površina	23
Preglednica 22: Osnovni podnebni podatki za analizo	30
Preglednica 23: Podnebni podatki po mesecih	30
Preglednica 24: Osončenost površin glede na orientacijo in obravnavani datum	31
Preglednica 25: Rezultati kontrolne analize zvočne izolirnosti za zunanjo steno	39
Preglednica 26: Rezultati kontrolne analize zvočne izolirnosti za tla nad zunanjim zrakom..	39
Preglednica 27: Podatki o toplotni coni 1	50
Preglednica 28: Podatki o toplotni coni 2	51
Preglednica 29: Rezultati izračuna gradbene fizike za obdobje ogrevanja	53
Preglednica 30: Primerjava rezultatov analize obstoječega in saniranega stanja	54

OKRAJŠAVE

RS	= Republika Slovenija
EU	= Evropska Unija
TSG	= Tehnična smernica za graditev
PURES	= Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah
PGD	= Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja
KS	= Konstrukcijski sklop
PVC	= Polivinilklorid
XPS	= Ekstrudiran polistiren
AB	= Armirani beton
NK	= Nosilna konstrukcija
KDS	= Koeficient dnevne svetlobe
JV	= Jugovzhod
JZ	= Jugoahod
SV	= Severovzhod
SZ	= Severozahod
SNES	= Skoraj nič-energijska stavba
OVE	= Obnovljivi viri energije

SIMBOLI

d	= debelina [m]
U	= toplotna prehodnost [W/m^2K]
T	= odmevni čas [s]
R'	= zvočna izolirnost [dB]
C	= korekcija za spektralno prilagoditev [dB]
$L'_{n,w}$	= normirana raven zvočnega tlaka udarnega zvoka [dB]
T_{opt}	= optimalna vrednost odmevnega časa [s]
Q_{NH}	= letna potrebna toplota za ogrevanje stavbe [kWh/a]
Q_{NC}	= letni potreben hlad za hlajenje stavbe [kWh/a]
λ	= koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]
g	= prepustnost celotnega spektra sončnega sevanja [-]
ψ	= linijska toplotna prehodnost [W/mK]
H'_T	= koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub [W/m^2K]
T_L	= povprečna letna temperatura zunanjega zraka [$^{\circ}C$]
f_o	= faktor oblike [m^{-1}]
z	= brezdimenzijsko razmerje med površino oken oziroma gradbenih odprtin in površino toplotnega ovoja stavbe [-]
V_e	= bruto kondicionirana prostornina stavbe [m^3]
Q_p	= potrebna primarna energija za delovanje stavbe [kWh/ m^2a]

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Na gradbenem področju je (kot na vseh preostalih področjih) v zadnjih letih veliko pozornosti namenjeno trajnosti, okolju prijaznim tehnologijam in predvsem energetski učinkovitosti, tako iz ekonomskega kot tudi okoljskega vidika. V globalnem smislu stavbe predstavljajo okoli 40 % končne porabe energije in proizvodnje toplogrednih plinov, po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije in Eurostata predstavlja poraba energije v stavbah v skupini držav EU-28 kar 38 %, v Sloveniji pa je delež stavb po končni porabi energije leta 2014 znašal 31,8 %, od tega 22,5 % končne porabe predstavljajo gospodinjstva, 9,3 % pa storitve (Rutar, 2016). Slednji navedeni odstotki predstavljajo le energijo, potrebno v stavbah, ne pa energije, potrebne za izdelavo gradiv, energije, potrebne v času gradnje in dekompozicije, predelave in eventuelnega recikliranja po uporabi. Prav v stavbah se kaže največji potencial za zmanjšanje porabe energije ter za povečanje rabe obnovljivih virov energije. Posledica tega so v zadnjih letih tudi evropske uredbe in direktive, ki urejajo to področje, med njimi Strategija 20-20-20 do 2020, temu sledijo tudi slovenska zakonodaja in pravilniki ter akcijska načrta za energetsko učinkovitost (AN URE 2020) in skoraj nič-energijske stavbe (AN sNES).

Tako pri načrtovanju novih stavb kot tudi pri načrtovanju sanacije objektov oziroma v našem primeru celostne energijske sanacije moramo z načrtovanjem, ukrepi in odločitvami zagotoviti, da objekt izpolnjuje predpisane osnovne zahteve. Z načrtovanimi ukrepi celostne energijske sanacije bomo vplivali na vsa področja osnovnih zahtev. Na izpolnjevanje večine osnovnih zahtev bomo vplivali neposredno, na statično in dinamično ustreznost objekta pa posredno z zasnovo zaščitnih konstrukcij, s katero nudimo ustrezno zaščito in preprečujemo deterioracijo in poškodbe nosilne konstrukcije. Ob načrtovanju celostne energijske sanacije moramo upoštevati vso veljavno zakonodajo, pravilnike in standarde, ki urejajo področje graditve in energijske učinkovitosti stavb.

V magistrskem delu bomo predstavili celostno energijsko sanacijo obravnavane stavbe Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina, ki kot javna stavba spada v skupino stavb, katerih energijska sanacija je predvidena v okviru zmanjšanja porabe energije v stavbah in zmanjšanja proizvodnje toplogrednih plinov. Sanacijo smo načrtovali v več korakih. Najprej smo pregledali vse pravilnike in zahteve, ki jih morajo stavba in njeni deli izpolnjevati, da smo v nadaljevanju lahko identificirali kritične elemente, ki so potrebni sanacije. Nato smo izvedli natančen pregled obstoječega stanja, vključno s pregledom dokumentacije objekta, ki smo jo imeli na voljo. Konstrukcijske sklope smo analizirali in ocenili ustreznost glede splošnega stanja vgrajenih materialov in zahtev, ki jih moramo izpolnjevati. Po identifikaciji kritičnih elementov smo zasnovali ustrezne ukrepe energetske sanacije in jih ločeno analizirali. Analizirali smo tudi

akustiko notranjega okolja, izračunali smo odmevne čase za dva prostora na šoli, za tipično učilnico in amfiteatralno predavalnico. Ob koncu pa smo analizirali celotno stanje ob upoštevanju predvidenih ukrepov ter izdelali načrt celostne energetske sanacije. K sanaciji smo pristopali celostno, s hkratnim ozirom tako na vse najpomembnejše zaščitne funkcije – toplotno izolacijo, zvočno izolacijo in hidroizolacijo, kot tudi na osvetlitev z dnevno svetlobo in druga načela stavbarstva. Cilj magistrske naloge je bil torej celostna energijska sanacija obravnavane stavbe, ki bo zagotavljala ustrezno energijsko učinkovitost in omogočala ohranjanje ustreznega notranjega okolja.

2 PREGLED IN ANALIZA TRENUTNEGA STANJA

2.1 Pravilniki in zahteve

Pri izdelavi magistrske naloge smo upoštevali vso trenutno veljavno zakonodajo, ki ureja področje, torej Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, PURES 2010 UL 52/2010 in Tehnično smernico za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije. Posamezne zahteve, ki smo jih morali izpolniti, so izpostavljene v nadaljevanju dela, in sicer za vsak element oziroma rezultat posebej. Pri analizi smo upoštevali tudi zahteve nekaterih drugih aktov, bodisi za določanje vhodnih podatkov za analizo bodisi za primerjavo ustreznosti stavbe ali njenih elementov. Tako smo upoštevali tudi Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/2002), ki ureja področje prezračevanja in klimatizacije v stavbah ter posledično toplotno okolje in kakovost notranjega zraka. Pravilnik navaja omejitve notranjih temperatur zraka in relativne vlažnosti ter minimalne zahteve prezračevanja v stavbah. Dodatno smo za preverjanje relevantnih konstrukcijskih sklopov upoštevali tudi tehnično smernico TSG-1-005: 2012 Zaščita pred hrupom.

Omeniti moramo tudi v uvodu omenjena akcijska načrta AN sNES in AN URE 2020 ter novo različico pravilnika PURES, ki pa je še v pripravi. Mogoče je torej, da bo zaradi prihajajočih sprememb na področju zahtev po energetski učinkovitosti stavb v tem delu načrtovana sanacija ob morebitnih drugačnih in strožjih zahtevah postala neustrezna. Kljub temu pa trenutno lahko upoštevamo le danes veljavno zakonodajo.

2.2 Opis stavbe

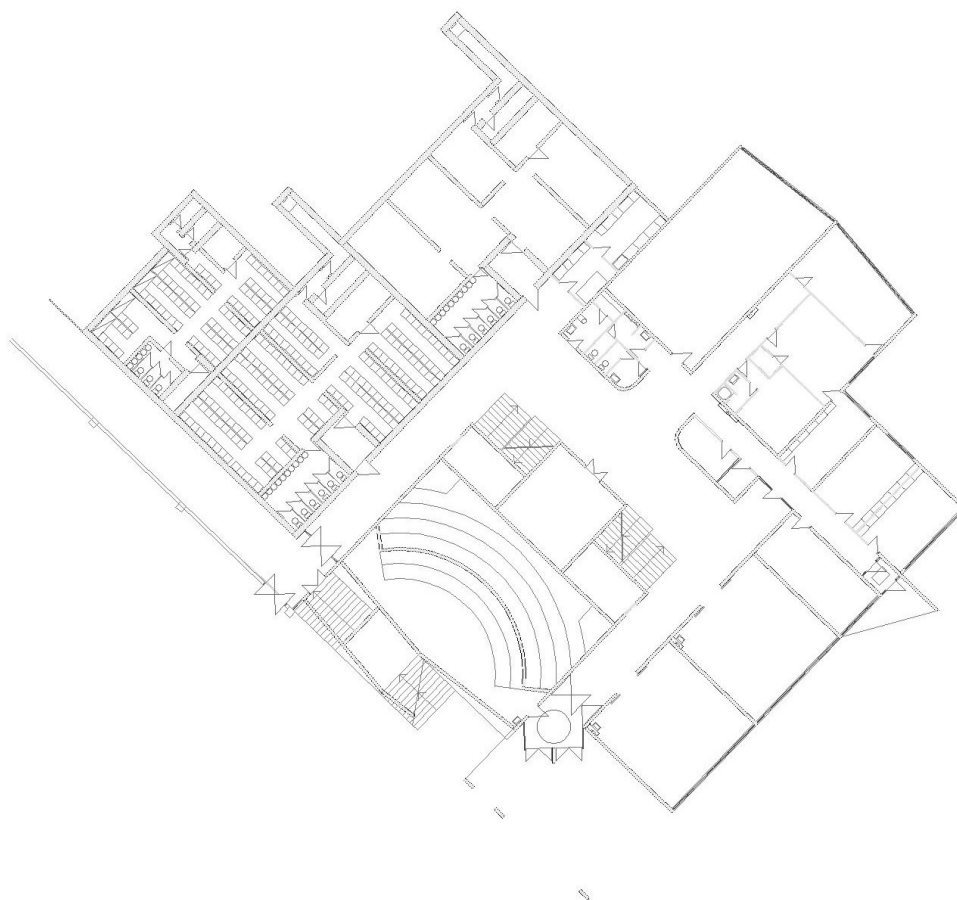
Obravnavan objekt Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina (slika 1) se nahaja na severozahodnem obrobju mesta Ajdovščina. Povezan je z objektom dijaškega doma (na jugozahodu), med stavbama pa se nahaja še kuhinja z jedilnico in večnamenska športna dvorana. Proti severozahodu je obravnavana stavba povezana s Športnim centrom Police s podzemnim oziroma pokritim prehodom, ki vodi tudi do učilnic in delavnic, ki so vkopane oziroma delno vkopane. Pred vhodom v šolo je dvorišče, ki ga omejuje armiranobetonski konzolni nadstrešek, ki pa ni fizično povezan s stavbo. Stavba je bila zgrajena v letu 1983 kot Šolski center usmerjenega izobraževanja. V neposredni bližini objekta (na severovzhodni strani) je tudi nova stavba Osnovne šole Danila Lokarja Ajdovščina.

Skozi leta se je v prostorih stavbe izvajalo več različnih učnih programov, trenutno pa se izvajata dva – gimnazija in predšolska vzgoja. Težav s pomanjkanjem prostora ni, saj se nekatere vsebine izvajajo v sosednjih stavbah, ki so povezane z obravnavano.



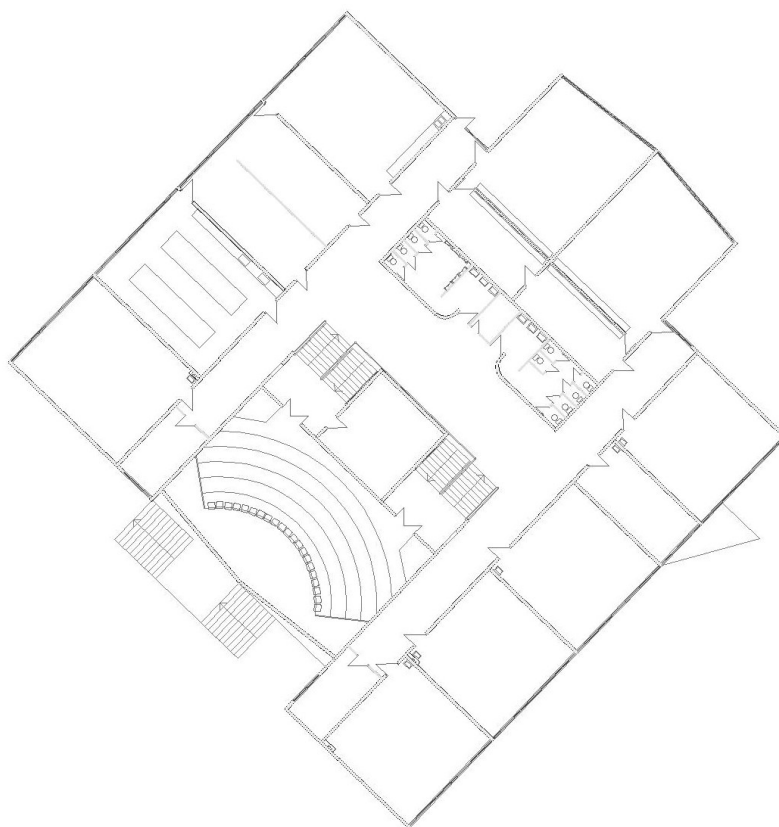
Slika 1: Obravnavana stavba Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina z okolico, fotografirana iz zraka (Občina Ajdovščina, 2017)

Zunanji gabariti stavbe so: 44 x 41 x 15 m, v kleti izven tlorisa nekoliko »štrli« zaklonišče. Stavba ima tri etaže: klet, pritličje in nadstropje, ter eno medetažo. Stavba ima tudi podstrešje, kjer se nahajajo akumulacijski rezervoarji toplotne črpalke. V splošnem je tloris stavbe zasnovan tako, da sta dva pasova učilnic locirana na severozahodni in jugovzhodni strani, v sredinskem pasu pa sta na zahodu locirani v kleti amfiteatralna učilnica, višje na medetaži med pritličjem in prvim nadstropjem pa knjižnica. V jedru stavbe je komunikacijsko jedro z dvema stopniščema in hodniki, medtem ko so proti vzhodu sanitarije in učilnice, orientirane proti zunanosti.



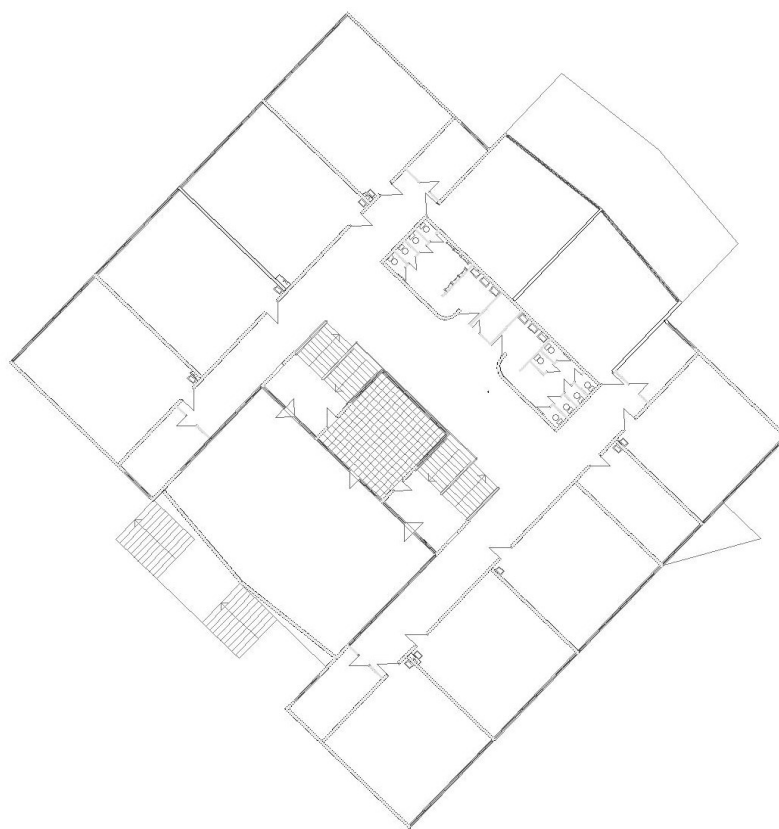
Slika 2: Tloris kleti (načrt ni v merilu)

V kleti (slika 2) je vhod z jugozahodne strani skozi vetrolov ($9,30 \text{ m}^2$), neposredno iz vetrolova je vhod v amfiteatralno predavalnico ($154,84 \text{ m}^2$). Na jugovzhodni strani sta dve učilnici ($2 \times 60,84 \text{ m}^2$), proti vzhodu so locirani prostori računovodstva ($28,08 \text{ m}^2$), prostori svetovalne službe ($22,72 \text{ m}^2$), dve pisarni ($22,72 \text{ m}^2$, $17,70 \text{ m}^2$), kabinet ($16,38 \text{ m}^2$) s tušem ($3,65 \text{ m}^2$) in predprostorom ($1,85 \text{ m}^2$), tajništvo ($27,54 \text{ m}^2$) in ravnateljeva pisarna ($31,20 \text{ m}^2$). Na jugovzhodu je stranski službeni vhod z nadstreškom in hodnik ($38,22 \text{ m}^2$), ki povezuje službene prostore. Nad vhodom je armiranobetonski nadstrešek. Na strani proti severovzhodu je še klub profesorjev ($102,18 \text{ m}^2$), pred vhodom v klub je prostor za razgovore ($20,83 \text{ m}^2$) ter ženske ($5,46 \text{ m}^2$) in moške ($6,14 \text{ m}^2$) sanitarije, v tem delu sta tudi prostor za čistila ($7,60 \text{ m}^2$) in fotolaboratorij ($23,10 \text{ m}^2$). Vse prostore povezuje glavni hodnik ($201,92 \text{ m}^2$). V jedru stavbe se nahajata stopnišči, med njima strojnica ($34,80 \text{ m}^2$) ter na vsaki strani strojnice še shrambi ($2 \times 13,44 \text{ m}^2$). Na severozahodni strani se nahaja zaklonišče za 500 oseb (cca 375 m^2), ki ga v nalogi ne obravnavamo. Na zahodni strani se nahaja povezava proti večnamenski športni dvorani, dijaškemu domu in kuhinji ter proti severu proti delavnicam in Športnemu centru Police. Skupna uporabna površina prostorov v kleti je $959,41 \text{ m}^2$.



Slika 3: Tloris pritličja (načrt ni v merilu)

V pritličju (slika 3) tloris v splošnem sledi tlorisu kleti, le da so učilnice ter kabineti razporejeni po celotnem tlorisu. Na južnem vogalu je nad vhodom dodatna učilnica v nizu učilnic v pasu na jugovzhodnem robu; tam tako ležijo štiri učilnice ($4 \times 60,84 \text{ m}^2$) in dva kabineta ($17,07 \text{ m}^2$ in $28,08 \text{ m}^2$). Proti severovzhodu sta dve učilnici ($2 \times 75,66 \text{ m}^2$) z dvema povezanima kabinetoma ($2 \times 27,30 \text{ m}^2$). Na severozahodni strani (nad zakloniščem v kleti) so v pasu tri učilnice ($3 \times 74,88 \text{ m}^2$) ter trije kabineti ($2 \times 36,96 \text{ m}^2$ in $27,30 \text{ m}^2$). V jedru stavbe sta stopnišči, hodnik ($258,40 \text{ m}^2$), prostori za čistila ($4,46 \text{ m}^2$) ter moške in ženske sanitarije ($2 \times 26,25 \text{ m}^2$). V jedru je na ravni medetaže med kletjo in pritličjem tudi vhod v amfiteatralno predavalnico ter arhiv ($34,80 \text{ m}^2$) med stopniščema. Skupna uporabna površina pritličja je $1159,20 \text{ m}^2$, pri čemer nismo upoštevali površine amfiteatralne predavalnice, ki se razprostira tudi v kleti.



Slika 4: Tloris nadstropja (načrt ni v merilu)

V nadstropju (slika 4) je tloris v splošnem skoraj enak tlorisu pritličja. Na jugovzhodni strani so štiri učilnice ($4 \times 60,84 \text{ m}^2$) in trije kabineti ($17,07 \text{ m}^2$, $28,08 \text{ m}^2$ in $13,71 \text{ m}^2$) – en dodaten v primerjavi s pritličjem. Na severovzhodni strani sta učilnici nekoliko manjši ($2 \times 60,84 \text{ m}^2$), manj izstopata iz tlorisa, prav tako pa nimata več priležnih kabinetov. Na severozahodni strani je v primerjavi s pritličjem namesto dveh kabinetov sedaj učilnica, skupaj so sedaj štiri ($4 \times 74,88 \text{ m}^2$), podobno kot na jugovzhodni strani pa je tudi tukaj sedaj en kabinet več, torej dva ($16,05 \text{ m}^2$ in $13,71 \text{ m}^2$). V jedru stavbe je hodnik ($248,11 \text{ m}^2$), prostori za čistila ($4,46 \text{ m}^2$), moške in ženske sanitarije ($2 \times 26,25 \text{ m}^2$) ter stopnišči. Na medetaži med pritličjem in nadstropjem je med stopniščema pokriti atrij ($34,80 \text{ m}^2$) in knjižnica s čitalnico ($154,00 \text{ m}^2$) nad amfiteatralno predavalnico. Skupna površina nadstropja skupaj z medetažo je $1093,05 \text{ m}^2$.

Podstrešje je dostopno, na njem je nameščen izmenjevalec toplote za hlajenje šole. Skupaj imajo vse etaže $3211,66 \text{ m}^2$ uporabne površine, od tega učilnice $1560,40 \text{ m}^2$, kar predstavlja približno polovico celotne uporabne površine stavbe.

Nosilna konstrukcija stavbe je armiranobetonska. Nosilne stene, medetažne plošče in strešne plošče so debeline 20 cm. Izjema so stene in plošče zaklonišča, ki merijo 40 cm. Predelne stene nekaterih prostorov so opečnate, debeline 10 cm. Temelji so pasovni, armiranobetonski,

različnih dimenzij. Podrobnejši opisi posameznih konstrukcijskih sklopov sledijo v nadaljevanju dela. Ustreznost in stanje nosilne konstrukcije nista predmet obravnave tega dela, osredotočili smo se le na celostno energijsko sanacijo objekta. V izogib morebitnim težavam bi bilo potrebno strokovno preučiti tudi stanje nosilne konstrukcije in preveriti statično ter dinamično ustreznost objekta, da bi lahko v primeru potencialnih neustreznosti stavbo tudi konstrukcijsko sanirali.

2.3 Pregled in opis splošnega stanja stavbe, konstrukcijskih sklopov in zaščitnih konstrukcij

Izvedli smo pregled in analizo splošnega stanja stavbe, konstrukcijskih sklopov in zaščitnih konstrukcij, torej toplotne izolacije, hidroizolacije in zvočne izolacije stavbe. Za to smo temeljito pregledali dokumentacijo za pridobitev gradbenega dovoljenja, ki jo hranijo na šoli, in ob pregledu objekta na terenu preučili obstoječe stanje in odstopanja od dokumentacije, ki so posledica delnih sanacij ali zamenjav materialov oziroma stavbnega pohištva, ki so se izvedle tekom uporabe objekta od izgradnje. Tako smo karseda natančno določili dejansko stanje. Pomagali smo si tudi z nekaterimi načrti v elektronski obliki, ki jih so nam jih posredovali na šoli. Poleg tega smo se pogovorili tudi z odgovornimi za vzdrževanje na šoli o morebitnih težavah konstrukcijskih sklopov, zasteklitev in ostalega stavbnega pohištva ter stavbe kot celote.

2.3.1 Stanje zaščitnih konstrukcij in konstrukcijskih sklopov

Stanje zaščitnih konstrukcij in konstrukcijskih sklopov smo izvedli s pregledom dokumentacije in pregledom objekta. Na podlagi pridobljenih podatkov smo izvedli oceno stanja konstrukcijskih sklopov in zaščitnih konstrukcij. Preverili smo, ali konstrukcije ustrezajo omejitvam in pogojem trenutno veljavne zakonodaje in pravilnikov. Za izračun U-faktorja in difuzije vodne pare smo uporabili program Energija 2014 podjetja Knauf Insulation, prikazani U-faktorji so vmesni rezultati analize, torej rezultati, ki nam jih program poda ob upoštevanju vseh vhodnih podatkov o geometriji, o zemljini (pri konstrukcijskih sklopih v kotaktu s tlemi) ipd., te vrednosti torej ne predstavljajo toplotne prehodnosti v smeri pravokotno skozi konstrukcijski sklop. Poleg tega smo za relevantne konstrukcijske sklope preverili tudi ustreznost njihove zvočne izolirnosti. To smo izvedli s programom Hrup'13, ki je zasnovan v programskem orodju Excel in je na voljo na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. S pomočjo tehnične smernice za zaščito pred hrupom smo določili ustrezne zunanje ravni hrupa in preverili konstrukcije, rezultati so predstavljeni pri obravnavanih sklopih.

Konstruktivski sklopi tal na terenu so v splošnem v zelo dobrem stanju. Pred leti je prišlo do razlitja bližnjega vodotoka, potoka Lokavšček, voda je zalila kletne prostore šole, saj je klet šole vkopana v teren in tako nižje od vrha brežin. Ob tem so bile poškodovane finalne obloge tal in stavbno pohištvo, poškodbe so sanirali z zamenjavo materialov. Tako je sedaj konstrukcija tal na terenu v dobrem stanju, škodo so odpravili in ni opaznih nikakršnih znakov pomanjkljivosti te konstrukcije. Iz projektne dokumentacije smo ugotovili, da se sestava konstrukcijskega sklopa tal na terenu nekoliko razlikuje med prostori, nekateri prostori nimajo izvedene finalne obloge, v amfiteatralni predavalnici pa je s stopnicami in nasutjem izvedena konstrukcija za tribuno.

V nadaljevanju so izpisani sestavi konstrukcijskih sklopov in izračun toplotne prehodnosti. Pri tleh na terenu, ki so v programu obravnavana kot tla vkopane kleti je pri izračunu v programu upoštevan tudi vpliv zemljine in zidu kleti, prevodnost tal smo predpostavili na 2 W/mK, navedene vrednosti se torej lahko razlikujejo od vrednosti toplotne prehodnosti v smeri pravokotno skozi konstrukcijski sklop.

Preglednica 1: KS tla na terenu 1

Material:	d [m]
Guma	0,01
Cementni estrih	0,06
Stiropor	0,04
Hidroizolacija	0,01
Podložni beton*	0,10
Tampon*	0,20

* Označene plasti se ne upoštevajo v izračunu toplotne prehodnosti U

Preglednica 2: KS tla na terenu 2 (strojnica)

Material:	d [m]
Cementni estrih	0,05
Stiropor v (PVC)	0,04
Hidroizolacija	0,01
Podložni beton*	0,10
Tampon*	0,20

* Označene plasti se ne upoštevajo v izračunu toplotne prehodnosti U

Preglednica 3: KS tla na terenu 3 (amfiteatralna predavalnica)

Material:	d [m]
Guma	0,01
Cementni estrih	0,04
Heraklit	0,04
Podložni beton	0,10–0,38
Nasutje	0,00–1,50
Zaščita hidroizolacije	0,03
Hidroizolacija	0,01
Podložni beton*	0,10
Tampon*	0,20

* Označene plasti se ne upoštevajo v izračunu toplotne prehodnosti U

$$U_{\text{Tla na terenu}} = 0,225 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{\text{max}} = 0,350 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Pri izračunu U-faktorja tal na terenu smo upoštevali enotno sestavo konstrukcijskega sklopa po vzoru KS tal na terenu 1, s tem smo zanemarili doprinos nasutja in stopniščne konstrukcije KS tal na terenu 3, vendar smo na varni strani. U-faktor obstoječe konstrukcije ustreza minimalnim zahtevam.

Preglednica 4: KS tla nad zunanjim zrakom

Material:	d [m]
Guma	0,01
Cementni estrih	0,06
Stiropor	0,02
AB plošča	0,20

$$U_{\text{tla nad zun. zrakom}} = 1,121 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,300 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Konstrukcija ne ustreza minimalnim zahtevam po toplotni izolativnosti, zato je potrebna namestitev dodatne zunanje izolacije. Konstrukcijskemu sklopu tal nad zunanjim zrakom smo preverili tudi ustreznost zvočne izolirnosti, analizo smo izvedli na primeru karakteristične učilnice, za katero smo izračunali tudi odmevni čas $T = 0,8 \text{ s}$. Rezultati analize zvočne izolirnosti so predstavljeni v spodnji preglednici 5.

Preglednica 5: Rezultati analize zvočne izolirnosti obstoječe tal nad zunanjim zrakom

Zahtevana izolirnost ($R'_{w,f} + C_{tr,f}$)	27 dB
Izračunana izolirnost R'_w	52 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

Zvočna izolirnost obstoječega stanja tal nad zunanjim zrakom zadostuje zahtevani, zato pričakujemo, da bo tudi po namestitvi dodatne toplotne izolacije tako.

Preglednica 6: KS stena proti terenu 1

Material:		d [m]
Nasutje*		
Zaščita (trapez. Al. ploč.)*		
»TIM«	Hidroizolacija	0,01
	Stiropor	0,04
	Avtomat plošče	
AB stena		0,20

* Označene plasti se ne upoštevajo v izračunu toplotne prehodnosti U

Preglednica 7: KS stena proti terenu 2

Material:		d [m]
Nasutje*		
Zaščita (salonitka)*		
»TIM«	Hidroizolacija	0,01
	Stiropor	0,04
	Avtomat plošče	
AB stena		0,20

* Označene plasti se ne upoštevajo v izračunu toplotne prehodnosti U

$$U_{\text{stena proti terenu}} = 0,597 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,350 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa stene proti terenu ne ustreza zahtevam, potrebna je dodatna toplotna izolacija. Posebno pozornost moramo nameniti odstranjevanju obstoječe zaščite, kjer lahko lokalno pričakujemo azbestno-cementne plošče, ki služijo kot zaščita obstoječe hidro in toplotne izolacije.

Preglednica 8: KS zunanja stena 1

Material:	d [m]
Al. Plastificirana trapezna pločevina	
Neprezračevana zračna plast (ocena)	0,01
»Z« nosilci pločevine	
Tervol	0,05
AB stena	0,20

$$U_{\text{zunanja stena 1}} = 0,656 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Konstrukcija zunanje stene (slika 5) ne zagotavlja ustrezne minimalne toplotne zaščite, poleg tega so opazne tudi lokalne površinske poškodbe in lokalna dotrajanost trapezne pločevine. Zunanja stena je potrebna celovite sanacije, kjer obstoječ toplotni ovoj odstranimo in nadomestimo z novim.



Slika 5: Zunanja stena 1 – Fasada s trapezno pločevino

Preglednica 9: KS zunanja stena 2

Material:	d [m]
Kontaktne izolacijske tankoslojne fasade (Demit)	0,05
AB stena	0,20

$$U_{\text{zunanja stena 2}} = 0,707 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Poleg tega, da konstrukcija ne zagotavlja zadostne toplotne zaščite, je tudi opazno dotrajana in razpokana. Lokalno so izraziti znaki zamakanja, na severnem, osojнем delu stavbe pa tudi rast alg, kot je razvidno s slik 6 in 7. Obstoječi toplotni ovoj je na teh mestih preveč dotrajan, zato ga odstranimo in v celoti nadomestimo z novim.



Slika 6: Zunanja stena 2 – Kontaktno izolacijska tankoslojna fasada



Slika 7: Zunanja stena 2 – Vegetacija na severni strani površine fasade

Zunanji steni smo preverili tudi ustreznost zvočne izolirnosti, rezultati so predstavljeni v preglednici 10.

Preglednica 10: Rezultati analize zvočne izolirnosti obstoječe zunanje stene

Zahtevana izolirnost ($R'_{w,f} + C_{tr,f}$)	26 dB
Izračunana izolirnost R'_w	30 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

Preglednica 11: KS streha

Material	d [m]
Al. Plastificirana trapezna pločevina	
Nosilci pločevine / Letve h=10 cm	
Tervol (PTP)+PVC	0,10
AB plošča	0,20

Iz pregleda PGD dokumentacije smo ugotovili, da je bil del strehe ob izgradnji pokrit s cementno–vlaknasto valovito kritino (t. i. *salonitko*), pozneje je bil prenovljen in prekrit s trapezno aluminijasto plastificirano pločevino, podobno kot preostanek strehe.

$$U_{\text{strehe}} = 0,401 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,200 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Konstrukcija strehe ne ustreza zahtevam glede toplotne prehodnosti, pri sanaciji je potrebna vgradnja dodatne izolacije.

V preglednicah 12, 15, 17, 18, 19 in 20 so prikazani konstrukcijski sklopi notranjih delitev. Izračun in primerjava U-faktorja s predpisano omejitvijo sta izvedena za delitve, ki razmejujejo ogrevane in neogrevane cone, ki so opisane v nadaljevanju dela. Izvedli smo tudi izračun zvočne izolirnosti relevantnih delitev.

Preglednica 12: Nosilna AB stena

Material	d [m]
Armirani beton	0,20

$$U_{\text{AB stene}} = 3,306 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,700 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Konstrukcija ne zagotavlja ustrezne toplotne zaščite, vendar ni kritična, saj razmejuje ogrevane prostore od manj ogrevanih, oboji pa se nahajajo znotraj toplotnega ovoja. Preverili smo tudi zvočno izolirnost obravnavane stene za primera, ko stena razmejuje dve učilnici ter učilnico in hodnik. Rezultati analiz zvočne izolirnosti za AB steno so prikazani v preglednicah 13 in 14.

Preglednica 13: Rezultati analize zvočne izolirnosti za AB steno med dvema učilnicama

Zahtevana izolirnost R'_w	52 dB
Izračunana izolirnost R'_w	56,8 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

Preglednica 14: Rezultati analize zvočne izolirnosti za AB steno med učilnico in hodnikom

Zahtevana izolirnost R'_w	47 dB
Izračunana izolirnost R'_w	56,8 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

AB stena nudi ustrezno zvočno izolirnost tako med dvema učilnicama, kot tudi med učilnico in hodnikom.

Preglednica 15: Predelna opečna stena

Material	d [m]
Votla opeka	0,10

$$U_{\text{opečne stene}} = 2,760 \text{ W/m}^2\text{K} > U_{\text{max}} = 0,700 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa presega predpisano vrednost, vendar tudi v tem primeru to ni problematično, saj stena razmejuje prostore znotraj toplotnega ovoja. Izvedli smo tudi analizo zvočne izolirnosti za primer, ko stena ločuje kabinet od hodnika, rezultati so prikazani v preglednici 16.

Preglednica 16: Rezultati zvočne izolirnosti za opečnato steno med kabinetom in hodnikom

Zahtevana izolirnost R'_w	47 dB
Izračunana izolirnost R'_w	46,0 dB
Ustreznost zaščite	Ne ustreza

Ugotovili smo, da opečnata predelna stena ne zagotavlja zadostne zvočne izolirnosti. Opomniti

moramo, da smo za ta primer lastnosti osnovnega materiala – votle opeke predpostavili na podlagi podatkov, dostopnih pri proizvajalcih sodobnih materialov. Dopuščamo možnost, da je zaradi razlike med dejanskim vgrajenim materialom in našim predpostavljenim materialom konstrukcija ustrezna, iz istega razloga pa je dejansko stanje zvočne izolirnosti lahko še slabše. Priporočamo, da se prostore, ki jih ločuje taka stena, obravnava individualno in identificira težave z nezadostno zvočno izolirnostjo, priporočamo, da se izvede meritve in na podlagi teh načrtuje ustrezno sanacijo konstrukcijskega sklopa z dodatno izolativno oblogo s katero bo dosežena zadostna zvočna izolirnost.

Preglednica 17: Medetažna konstrukcija učilnice, kabineti in hodniki

Material	d [m]
Guma	0,01
Cementni estrih	0,06
Stiropor (v PVC)	0,02
AB plošča	0,20

Preverili smo zvočno izolirnost medetažne konstrukcije za primer, ko ta razmejuje učilnico in hrupno učilnico, ki ga ponuja program Hrup'13. Rezultati so prikazani v spodnji preglednici 18.

Preglednica 18: Rezultati analize zvočne izolirnosti za medetažno konstrukcijo med učilnico in hrupno učilnico

	R'_w	$L'_{n,w}$
Zahtevana izolirnost	60,0 dB	58 dB
Izračunana izolirnost	60,1 dB	48,7 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza	Ustreza

Preglednica 19: Medetažna konstrukcija sanitarije

Material	d [m]
Keramika v malti	0,01
Cementni estrih	0,07
Stiropor v (PVC)	0,01
AB plošča	0,20

Preglednica 20: Medetažna konstrukcija atrij

Material	d [m]
Ravna pohodna streha »TIM« Laško	0,14
- Betonske prane plošče	
- Mivka	
- Hidroizolacija	
- Toplotna izolacija	
- Parna zapora	
Naklonski beton	0,02–0,14
AB plošča	0,20

Atrijski del je bil naknadno pokrit s streho, tako da je ta konstrukcija sedaj medetažna konstrukcija, načrtovana pa je bila kot pohodna strešna konstrukcija.

2.3.2 Stanje transparentnega dela stavbnega ovoja in preostalega stavbnega pohištva

Obstoječa vgrajena okna so iz PVC z dvoslojno zasteklitvijo (slika 8) in so v dobrem stanju. Na šoli o kakršnihkoli težavah z okni ne poročajo. Vse zasteklitve so nameščene v ravnino notranjega roba nosilne konstrukcije, kar pomeni linijske toplotne mostove po obsegu (špaletah) vseh zunanjih zasteklitev, čeprav je nameščene tudi nekaj »bočne« izolacije ob stebrih. Poglobljena zasteklitev glede na ostalo površino fasade je priporočljiva za poletni čas in vroče klime, ker je pregrevanje stavbe s tem lažje rešljivo in manj problematično. Na podlagi ogleda na terenu in ocene zasteklitev sklepamo, da je toplotna prehodnost zasteklitve $U_{st} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, skupna toplotna prehodnost zasteklitve pa $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, kar ustreza minimalnim tehničnim zahtevam, lastnosti smo ocenili s pomočjo podatkov, dostopnih na spletni strani enega od proizvajalcev PVC stavbnega pohištva (MIK Celje, 2018).



Slika 8: Zastekljene površine na severozahodni strani

Streha nad atrijem je bila izvedena po izgradnji objekta, v začetku pa ni bila predvidena. Izvedena je s kovinsko aluminijasto podkonstrukcijo in pokrita s polikarbonatno kritino, ki omogoča prehod dnevne svetlobe. Polikarbonatna kritina je na pogled izrazito dotrajana, kot je razvidno iz slike 9, in ob močnejših nalivih prihaja do njenega puščanja. Podatkov o vgrajenem materialu in njegovih lastnostih nimamo, ocenjujemo pa, da je zamenjava kritine nad atrijem potrebna. V notranjosti atrija je na stenah izvedena tudi fasada s trapezno pločevino, saj je bil atrij ob izgradnji odkrit in izpostavljen zunanjim vplivom. Pločevina je nekoliko dotrajana, opazne so površinske poškodbe. Predlagamo, da ob sanaciji strehe nad atrijem obstoječo fasado skupaj z izolacijo na teh površinah odstranimo in nadomestimo z običajnim ometom.



Slika 9: Streha nad atrijem iz notranjosti

V strehi nad knjižnico in čitalnico so vgrajene štiri svetlobne kupole dimenzije 116 cm (odprtina 120 cm), ki omogočajo večjo osvetljenost z dnevno svetlobo v tem prostoru. Kupole so na pogled v dobrem stanju, v preteklosti pa je ob močnejših nalivih z burjo prihajalo do puščanja, kar je opazno na ometu (slika 10), vendar so ta problem rešili z zatesnitvijo problematičnih točk z zunanje strani. Toplotne izolativnosti obstoječih svetlobnih kupol nismo mogli natančno določiti, a kljub morebitni ustreznosti glede minimalnih zahtev ($U_{\max} = 2,40 \text{ W/m}^2\text{K}$) smo se odločili, da je v sklopu celostne energijske sanacije strehe in toplotnega ovoja primerno, da zamenjamo tudi svetlobne kupole – tudi zaradi možnosti boljšega izkoriščanja osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo.



Slika 10: Ena od štirih svetlobnih kupol nad čitalnico z opaznimi znaki puščanja na ometu

Zunanja vrata imajo aluminijast okvir z dvoslojno zasteklitvijo. Vgrajena so bila nedavno, ko so po že omenjeni poplavi potoka v bližini obnovili klet. Zunanja vrata so v zelo dobrem stanju in sklepamo, da ustrezajo zahtevam – torej, da vrata ne presegajo toplotne prehodnosti $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, fiksne zasteklitve ob glavnem vhodu pa ne presegajo $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Notranja vrata so v zelo dobrem stanju, so praktično nova po celotni stavbi (slika 11). Gre za lesena panelna vrata s kovinskim podbojem in nadsvetlobo z zamegljenim steklom. Zamenjava ni potrebna, saj sklepamo, da ustrezajo vsem zahtevam.



Slika 11: Tipična notranja vrata z nadsvetlobo v obravnavani stavbi

Na prehodu iz šolske stavbe proti povezani večnamenski dvorani oziroma proti hodniku proti

delavnicam in Športnemu centru Police so vrata s kovinskimi okvirji in enoslojno zasteklitvijo (slika 12). Za vhodna vrata velja omejitev $U_{\max} = 1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$, ocenjujemo, da obstoječa vgrajena to vrednost presegajo, zato predlagamo vgradnjo novih. Glede na lokacijo samih vrat predvidevami, da bi bila potrebna vgradnja požarnih vrat v skladu s študijo požarne varnosti, ki pa ni predmet te naloge. Za potrebe nadaljnjega izračuna bomo predpostavili vrednost toplotne prehodnosti vrat $U = 1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Slika 12: Vrata na prehodu iz objekta šole na povezovalni hodnik in večnamensko športno dvorano

Notranje zasteklitve so okoli atrija in okoli knjižnice in čitalnice, saj v ta del preko svetlobnih kupol in delno prosojne strehe nad atrijem prehaja veliko dnevne svetlobe, ki se s pomočjo notranjih zasteklitev širi globlje v prostore. Notranje zasteklitve okoli atrija imajo dvoslojno zasteklitev ter kovinske okvirje, saj so bile prvotno načrtovane za stik z zunanjim okoljem, ostale notranje zasteklitve pa so fiksne z enoslojno zasteklitvijo in kovinskimi okvirji. Vse notranje zasteklitve so v dobrem stanju.

3 ANALIZA AKUSTIKE NOTRANJEGA OKOLJA

V šolah, predvsem v starejših stavbah, pogosto prihaja do problemov zaradi predolgega odmevnega časa v prostorih. Tudi v obravnavani stavbi poročajo o težavah, zato smo izračunali odmevni čas dveh prostorov, tipične učilnice in amfiteatralne predavalnice. Tipično učilnico smo analizirali, ker smo tako zaobjeli karseda veliko število prostorov, amfiteatralno predavalnico pa zato, ker so v preteklosti že imeli težave s predolgim odmevnim časom v tem prostoru in smo želeli ustreznost že izvedenih ukrepov preveriti.

Analizo akustike notranjega okolja smo izvedli s programom ARTIE (*Analysis of Reverberation Time in Indoor Environments*), ki so ga razvili na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Program omogoča izračun odmevnega časa prostora v frekvenčnem območju od 125 Hz do 4000 Hz in ga nato primerja s priporočenimi vrednostmi, ki se razlikujejo glede na namembnost prostora (Šubic, N., Kunič, R., 2018).

Za izračun smo potrebovali podatke o geometriji prostora, ki ga analiziramo, in podatke o površinah in materialih, ki se v prostoru nahajajo. Te smo ocenili ali predpostavili na podlagi ogleda prostorov, fotomateriala in dokumentacije, ki smo jo imeli na voljo. Predpostavljen optimalen odmevni čas glede na namembnost prostora, ki ga obravnavamo, je $T_{opt} = 0,69$ s za tipično učilnico in $T_{opt} = 0,89$ s za amfiteatralno predavalnico.

3.1 Tipična učilnica

Analizirali smo primer tipične učilnice, v kateri se izvaja pouk. Geometrijo in materiale smo predpostavili na podlagi ogleda in dokumentacije. Predpostavili smo, da se v učilnici nahaja 30 učencev, primer opreme tipične učilnice je predstavljen na sliki 13. V programu ARTIE smo definirali geometrijske lastnosti prostora, parametre notranjega okolja in definirali notranje površine, katerim smo pripisali materialne lastnosti in velikost površine.

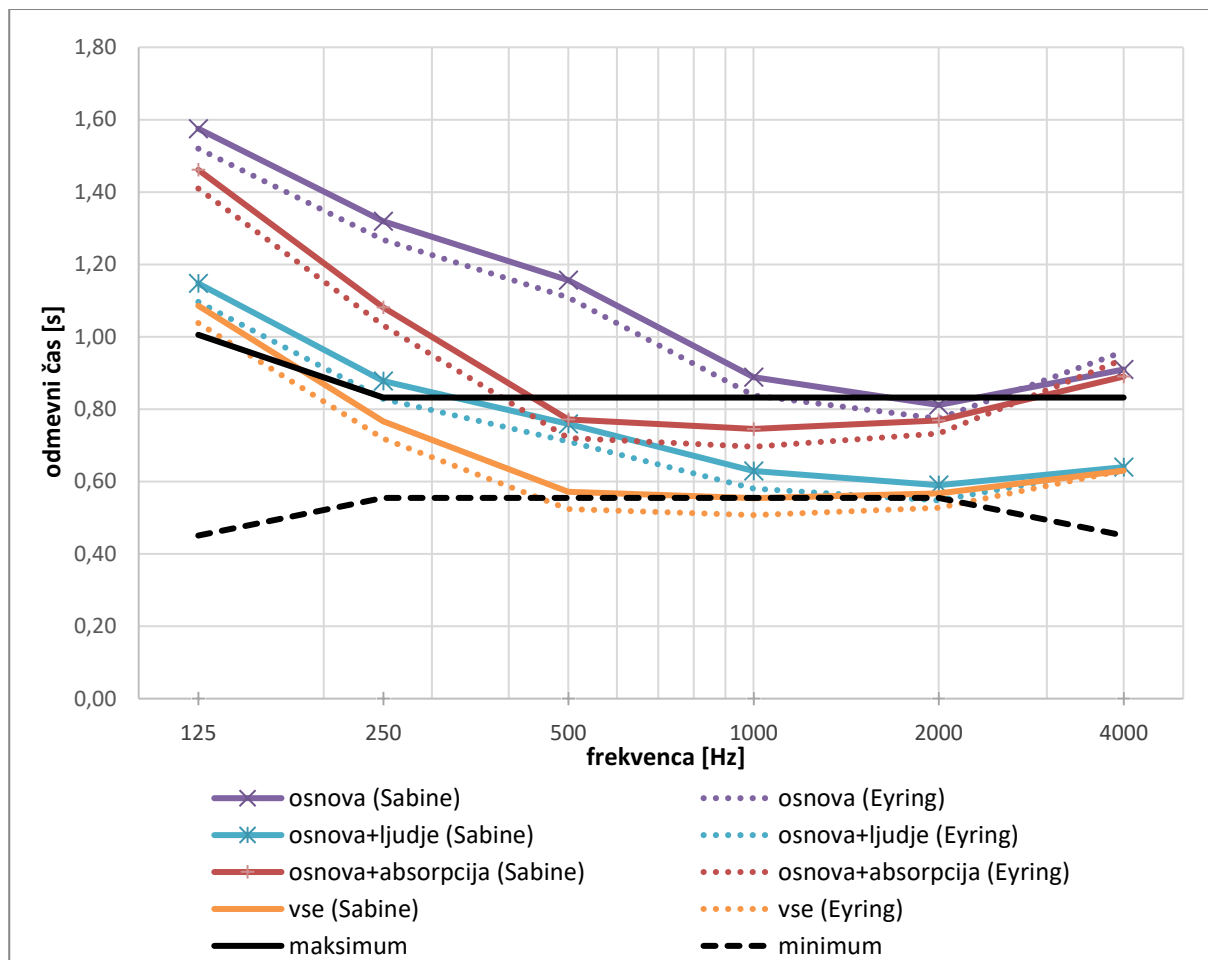


Slika 13: Oprema tipične učilnice

Rezultati analize odmevnega časa so prikazani na spodnjih grafikonih 14 in 15. Obravnavali smo primera ob 100 % zasedenosti (30 ljudi) in 50 % zasedenosti prostora (15 ljudi). Ugotovili smo, da je v prazni učilnici (grafikon 14) odmevni čas za vse frekvence razen tistih okoli 2000 Hz predolg, v v polni učilnici pa je odmevni čas dovolj kratek, razen pri frekvencah nižjih od približno 250 Hz. Preverili smo vpliv namestitve dodatnih absorpcijskih površin: te stanje izboljšajo, tako da je že v prazni učilnici odmevni čas dovolj kratek za frekvence višje od približno 500 Hz, v polni učilnici pa so odmevni časi za skoraj vse frekvence v optimalnem območju, kot je razvidno na grafikonu 14. Ekvivalentna absorpcijska površina dodanega absorpcijskega materiala je prikazana v preglednici 21.

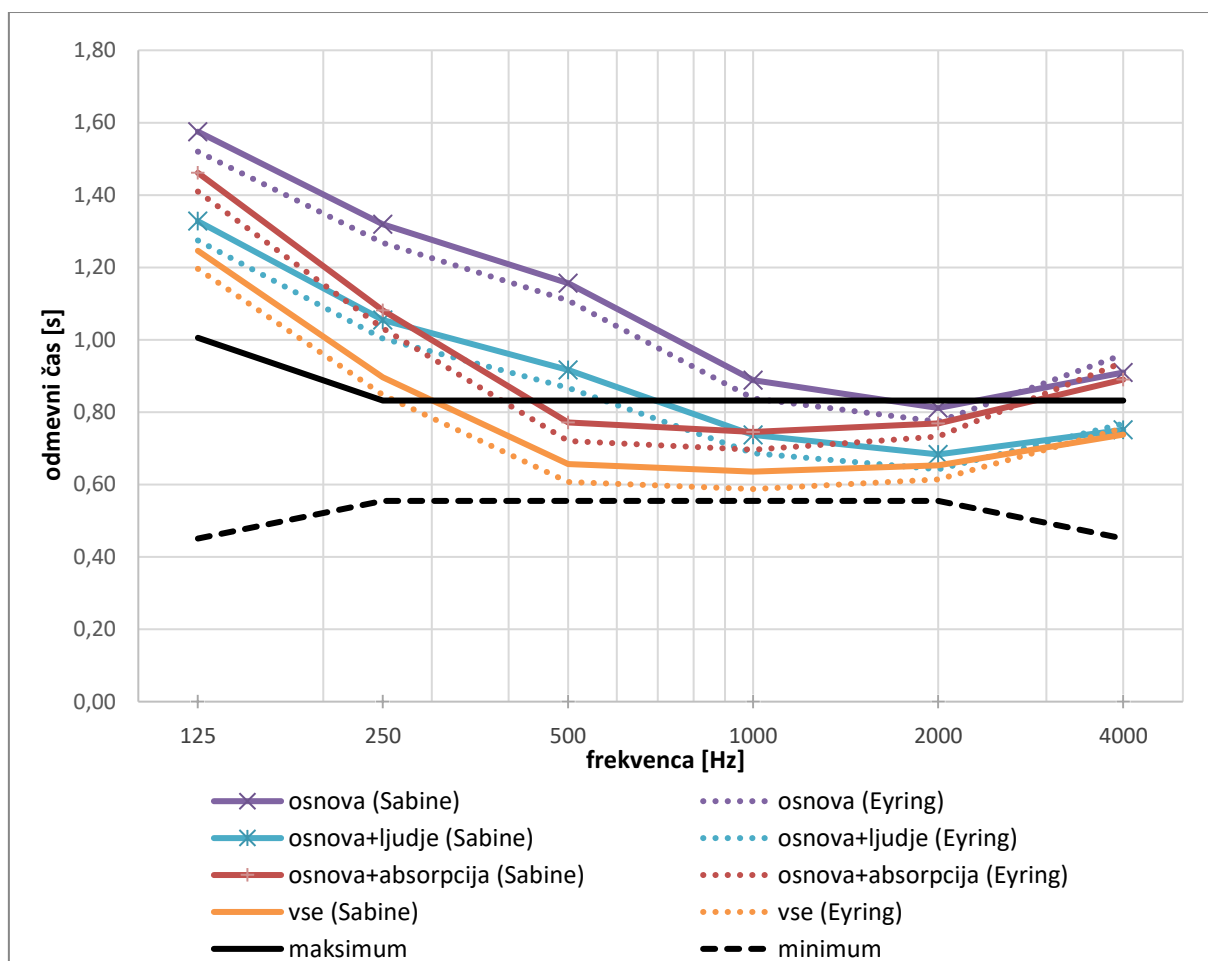
Preglednica 21: Ekvivalentna absorpcijska površina

Frekvenčni pasovi [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Ekvivalentna absorpcijska površina [m ²]	1,44	4,86	12,6	6,3	1,98	0,72



Grafikon 14: Rezultati analize odmevnega časa v tipični učilnici v programu ARTIE (30 ljudi)

V primeru s 50 % zasedenostjo, torej 15 ljudmi v prostoru, je doprinos ljudi k skrajšanju odmevnega časa manjši, kar je razvidno iz grafikona 15, enaka površina dodatnih absorpcijskih površin pa odmevne čase podobno kot v prejšnjem primeru skrajša.



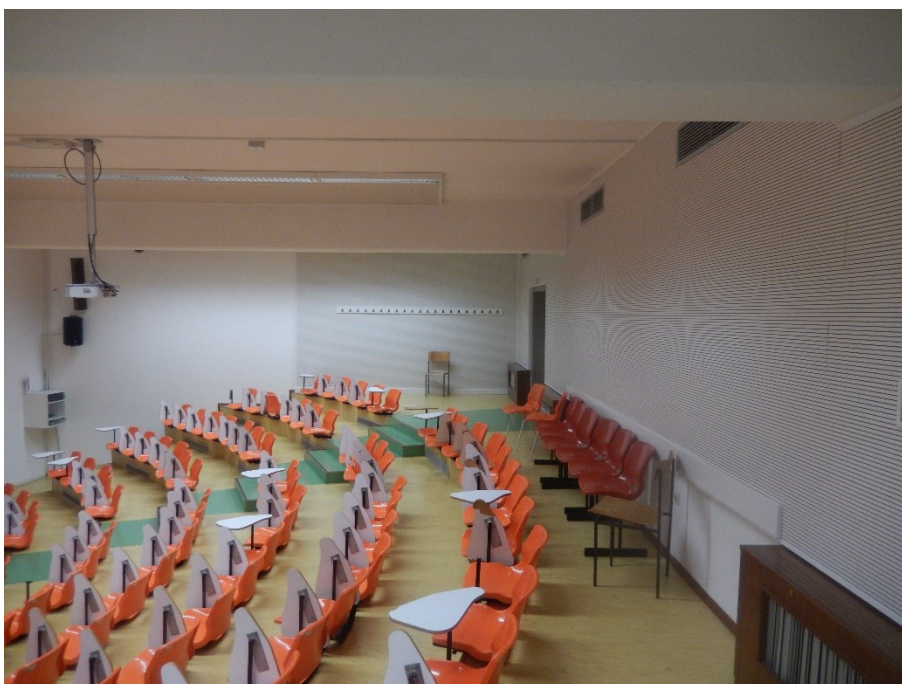
Grafikon 15: Rezultati analize odmevnega časa v tipični učilnici v programu ARTIE (15 ljudi)

3.2 Amfiteatralna predavalnica

Amfiteatralna predavalnica (sliki 16 in 17) je večji prostor na šoli, ki služi za predavanja, predstavitve in nekatere dogodke, prostor pa sprejme okoli 120 oseb. Na šoli so poročali, da so imeli v preteklosti težave z odmevnim časom, vendar so že izvedli določene ukrepe, namestili so približno 65 m² lesenih akustičnih plošč, del na strop, del pa na stranski steni ter zadnjo steno, kot je razvidno s slike 17. Izrazili so željo, da preverimo ustreznost ukrepov.



Slika 16: Del notranjosti amfiteatralne predavalnice

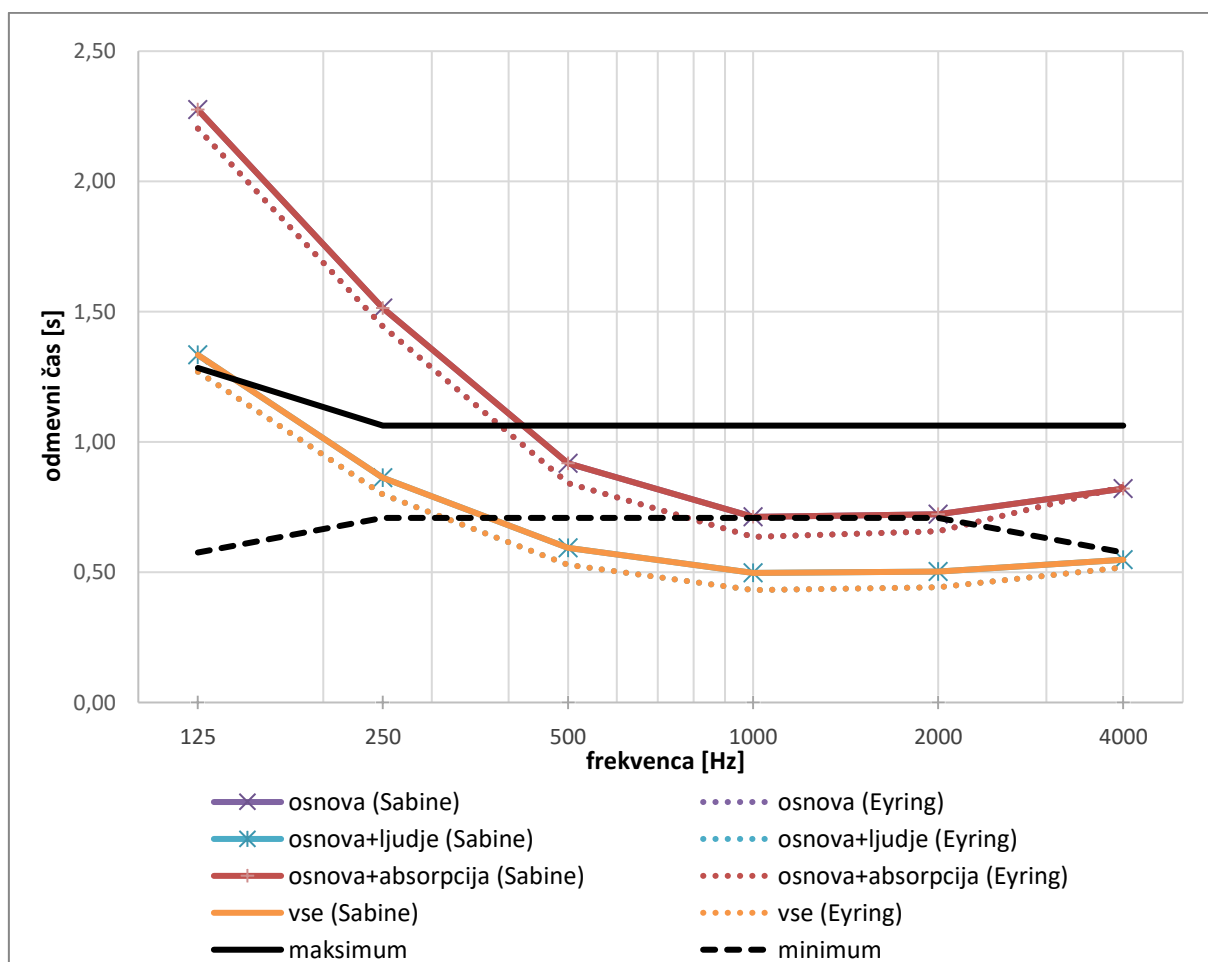


Slika 17: Del notranjosti amfiteatralne predavalnice z nameščenimi akustičnimi ploščami

V program ARTIE smo vnesli geometrijske podatke o širini, dolžini, višini in volumnu prostora, definirali parametre okolja, temperaturo in relativno vlažnost, število ljudi v prostoru ter namembnost prostora. V nadaljevanju smo definirali še vse površine v prostoru: tla, stene, strop, stavbno pohištvo, vso ostalo opremo in nameščene akustične plošče. Rezultati analize

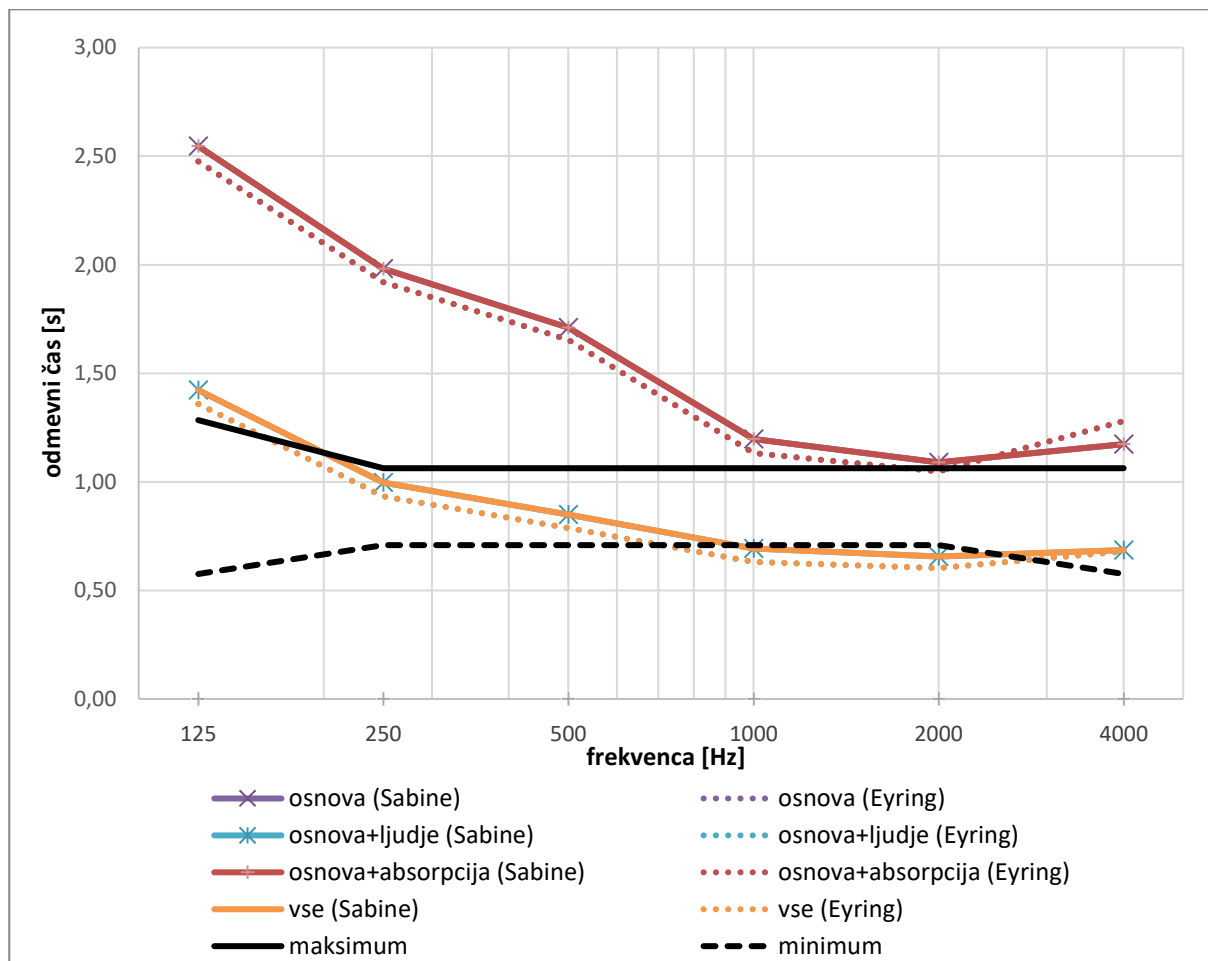
so razvidni iz prikaza (grafikon 18).

Opazovali smo dva scenarija, prazno in zasedeno predavalnico. Program odmevni čas računa po dveh različnih formulah, Sabinovi in Eyringovi, rezultati so za vsako predstavljeni ločeno, kot je razvidno iz grafikona 18. Z namestitvijo dodatnih 33 oziroma 27 m² ekvivalentnih absorpcijskih površin na frekvencah 125 oziroma 250 Hz, bi znižali odmevne čase na teh nizkih frekvencah na sprejemljivo raven. V scenariju prazne predavalnice so izračunani odmevni časi za frekvence višje od 500 Hz znotraj optimalnega območja, odmevni čas pri nižjih frekvencah pa je daljši od zaželenega. V scenariju zasedene predavalnice so odmevni časi za vse frekvence krajši, znotraj zaželenega območja pa so le odmevni časi nižjih frekvenc. Za najnižje frekvence okoli 125 Hz je odmevni čas še vedno predolg, za višje od približno oktavne pasove pa je odmevni čas prekratek. Seveda ostaja možnost, da dejansko stanje odstopa od računskega, za določitev točnega odmevnega časa priporočamo meritve. Kljub temu ugotavljamo, da so izvedeni inženirski ukrepi za skrajšanje ustrezni, saj odmevni čas (razen pri nizkih frekvencah) ni predolg.



Grafikon 18: Rezultati analize odmevnega časa v amfiteatralni predavalnici v programu ARTIE

Za boljšo oceno smo izvedli analizo še za stanje pred izvedeno akustično sanacijo. Rezultati so prikazani na grafikonu 19. Opazimo, da so odmevni časi za primer prazne predavalnice v vseh oktavnih pasovih predolgi, v primeru zasedene predavalnice pa so odmevni časi krajši. Za najnižje frekvence (125 Hz) je odmevni čas so predolgi, za frekvence 500 in 1000 Hz so nekoliko prekratki, v ostalih frekvenčnih pasovih pa so v območju optimalnih odmevnih časov, kot je razvidno iz grafikona 19.



Grafikon 19: Rezultati analize odmevnega časa v amfiteatralni predavalnici pred izvedeno akustično sanacijo

Glede na podatke spletne strani [Climate-Data.org](https://climate-data.org) je povprečna temperatura v mesecu

januarju 5,1 °C, v mesecu juliju pa 22,8 °C. Padavine so zmerne, 1164 mm na letni ravni. Najbolj suh mesec je marec, ko pade v povprečju 72 mm padavin, največ padavin pa povprečno pade v mesecu novembru, 123 mm. Padavine so torej precej enakomerno razporejene skozi vse leto. Za analizo porabe energije v stavbi smo uporabili podatke, ki nam jih za našo lokacijo ponudi program Knauf Insulation Energija. Prikazani so v spodnjih preglednicah 22 in 23.

Preglednica 22: Osnovni podnebni podatki za analizo

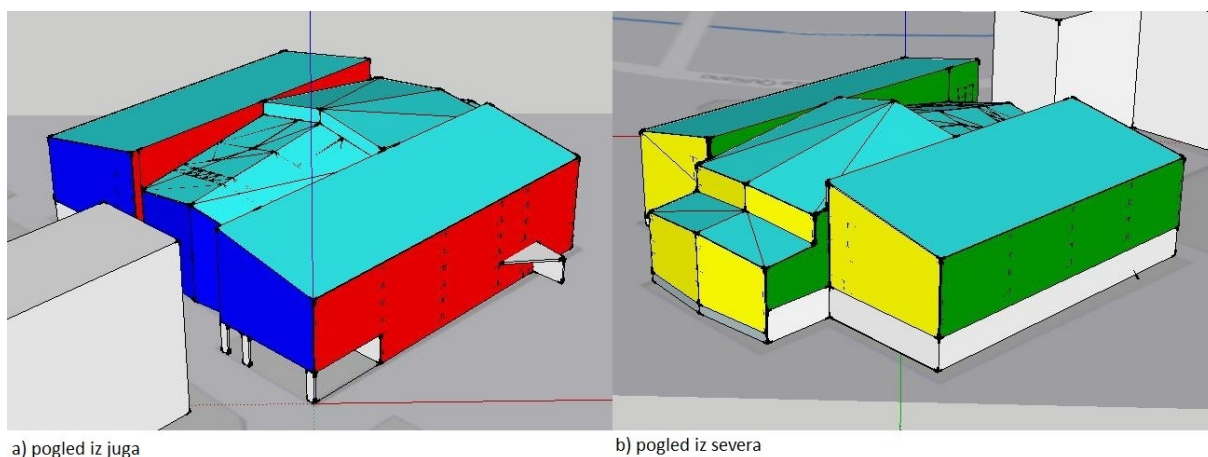
Podnebje	Primorsko
Temperaturni primanjkljaj	2500 Kdan/a
Projektna temperatura	-7 °C
Energija sončnega obsevanja	1260 kWh/m ² a

Preglednica 23: Podnebni podatki po mesecih

Mesec	Temperatura (°C)	Vlažnost (%)	Obsevanje (Wh/m ² d)
Januar	2	77	1118
Februar	4	73	1999
Marec	7	70	3087
April	11	70	4273
Maj	16	71	5392
Junij	19	73	5926
Julij	21	70	6055
Avgust	21	72	5132
September	17	77	3750
Oktober	12	79	2366
November	7	79	1274
December	3	79	968

V programu SketchUp smo izdelali nekoliko poenostavljen tridimenzionalni model stavbe, ki smo ga uporabili za različne analize. S pomočjo modela smo z vtičnikom SunHours analizirali osončenost stavbe; pred analizo smo modelu pripisali natančno geografsko lokacijo in modelirali okolico oziroma stavbo bližnjega dijaškega doma, za katero smo ocenili, da vpliva na osončenost zunanjih površin obravnavanega objekta, ostalih objektov nismo vključili. Na površine, ki smo jih preverjali, smo definirali mrežo z elementi dimenzij 0,5 x 0,5 m ter nato analizirali osončenost obravnavanih površin za tri karakteristične datume: zimski solsticij, 21.

12., spomladansko enakonočje, 20. 3., in poletni solsticij, 21. 6. Površine smo analizirali ločeno glede na orientacijo, vrednosti za streho smo analizirali ločeno, zaradi majhnih in raznovrstnih nagibov pa smo se odločili, da streho analiziramo kot celoto in ne ločeno po orientacijah posameznih površin (slika 21).



Slika 21: Površine stavbe obarvane glede na orientacijo: rdeča – JV, modra – JZ, rumena – SV, zelena – SZ, svetlo modra – streha

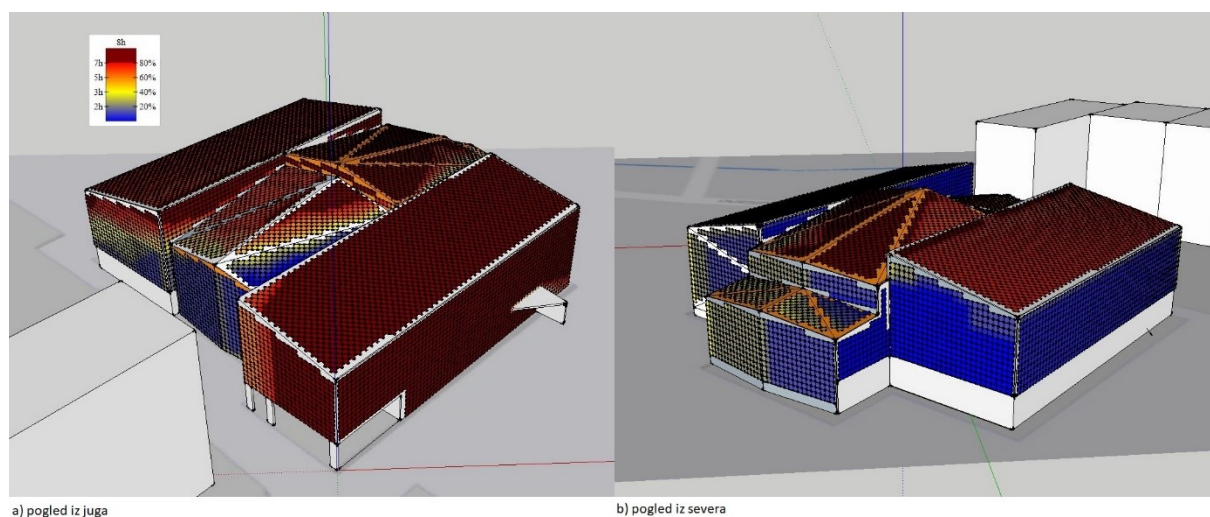
V preglednici 24 so predstavljeni rezultati analize osončenosti zunanjih površin stavbe glede na orientacijo na zgoraj naštetih karakterističnih datumih. Za vsako orientacijo in vsakega od datumov je zabeležena povprečna osončenost vozlišč mrež v obravnavani skupini v časovnih enotah in kot odstotek časa glede na maksimum, ki ga vtičnik SunHours postavlja za 21. 12. na 8 ur, za 20. 3. na 12 ur in za 21. 6. na 14 ur.

Preglednica 24: Osončenost površin glede na orientacijo in obravnavani datum

	21. 12.		20. 3.		21. 6.	
JV	7 h 2 min 20 s	88 %	8 h 19 min 59 s	69 %	9 h 19 min 33 s	67 %
JZ	3 h 12 min 40 s	40 %	6 h 0 min 16 s	50 %	8 h 35 min 42 s	61 %
SV	1 h 4 min 34 s	13 %	3 h 42 min 9 s	31 %	7 h 0 min 20 s	50 %
SZ	0 h 13 min 26 s	3 %	2 h 56 min 54 s	25 %	4 h 19 min 4 s	31 %
Streha	6 h 13 min 24 s	78 %	8 h 25 min 43 s	70 %	12 h 55 min 8 s	92 %

Ugotovimo, da so v vseh časih najslabše osončene površine, ki so orientirane proti SZ in SV, odvisno od datuma pa streha oziroma površine, ki so orientirane proti JV. Ob zimskem solsticiju je po pričakovanju na severnih površinah, še posebej na SZ, zelo malo osončenih površin, razmeroma malo je osončena tudi JZ stran, kar lahko pripišemo predvsem vplivu senčenja sosednjega objekta dijaškega doma. Iz istega razloga je tudi streha povprečno

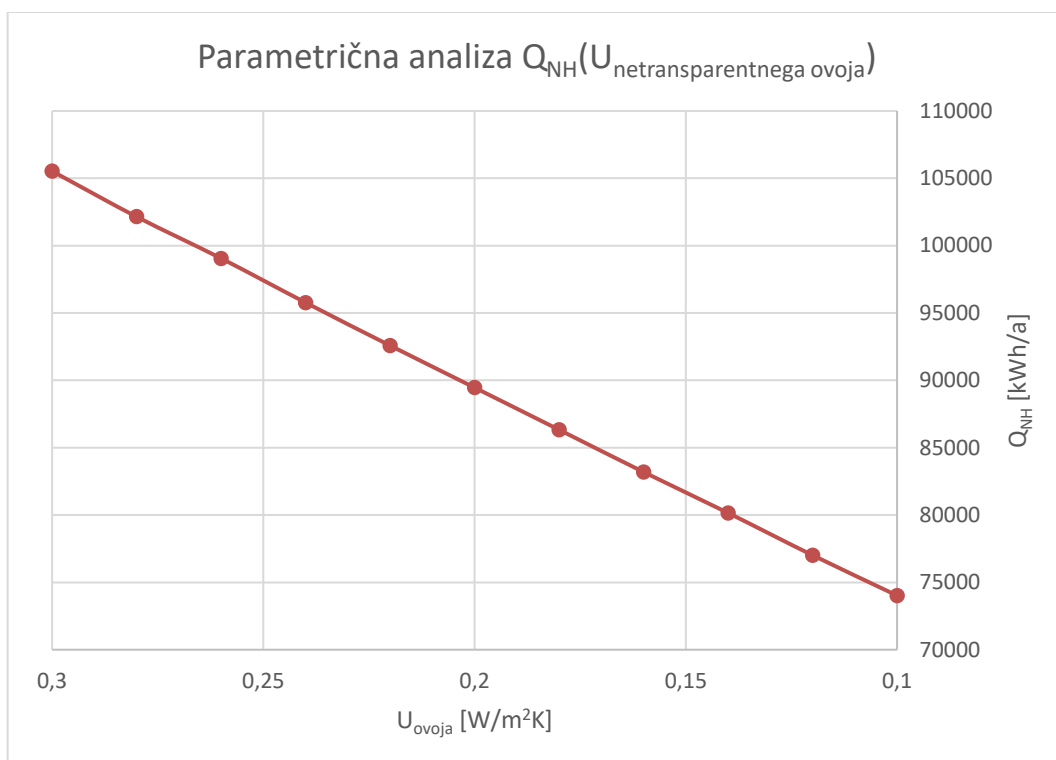
slabše oziroma manj osončena kot JV površine, k tej razliki pa prispevajo tudi severno orientirane površine strehe, nizek vpadni kot sončnih žarkov in samoosenčenje dela objekta. Vizualni prikaz rezultatov za zimski solsticij je prikazan na spodnji sliki (slika 22). Ob spomladanskem enakonočju imajo osončenosti podoben vzorec, le razlike med najbolj in najmanj osončenimi orientacijami so manjše, streha in JV površine so skoraj enako povprečno osončene, severno orientirane površine pa so občutno bolj osončene, kar je posledica daljše poti sonca po nebu. Ob poletnem solsticiju ima najvišjo osončenost pričakovano streha, saj je zaradi visokega vpadnega kota v poletnih mesecih najbolj izpostavljena soncu. Razlika med osončenostjo JV in JZ površin je v primerjavi z ostalimi analiziranimi datumi tokrat najmanjša, tudi to je posledica visokega vpadnega kota, saj tako senčenje sosednjega objekta nima velikega vpliva.



Slika 22: Primer prikaza rezultatov osončenosti zunanjih površin objekta za 21. 12.

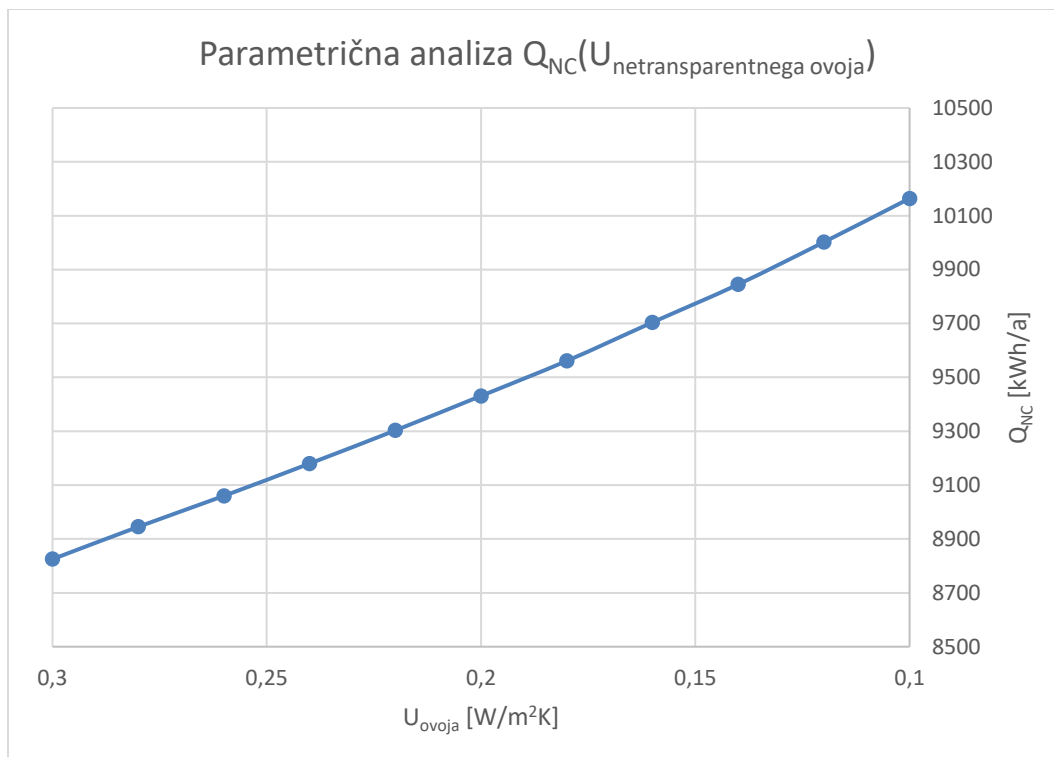
4.2 Parametrična analiza U-faktorja toplotnega ovoja in debeline dodatne izolacije

S pomočjo programskega orodja KI Energija 2014 smo izvedli parametrično analizo vpliva toplotne prehodnosti U na letni količini toplote Q_{NH} in hladu Q_{NC} , ki jo potrebuje stavba. Toplotno prehodnost zunanjih netransparentnih površin, ki jih saniramo, smo spreminjali od $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ do $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ v korakih $\Delta U = 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$. Podobno analizo smo izvedli tudi za debelino dodatne vgrajene izolacije, to smo spreminjali od $d_{\text{dod.izo.}} = 4 \text{ cm}$ do $d_{\text{dod.izo.}} = 24 \text{ cm}$ v korakih $\Delta d = 2 \text{ cm}$. Pri drugi analizi nas je zanimala neposredna povezava med količino vgrajenega materiala in potrebnima letnima količinama toplote Q_{NH} in hladu Q_{NC} . S tem opazujemo tudi povezavo med ceno začetne investicije v vgrajeni material in poznejšimi stroški, ki nastajajo med obratovanjem in uporabo stavbe. Pri analizah smo izvzeli poletna meseca julij in avgust, ko objekt ni v uporabi.



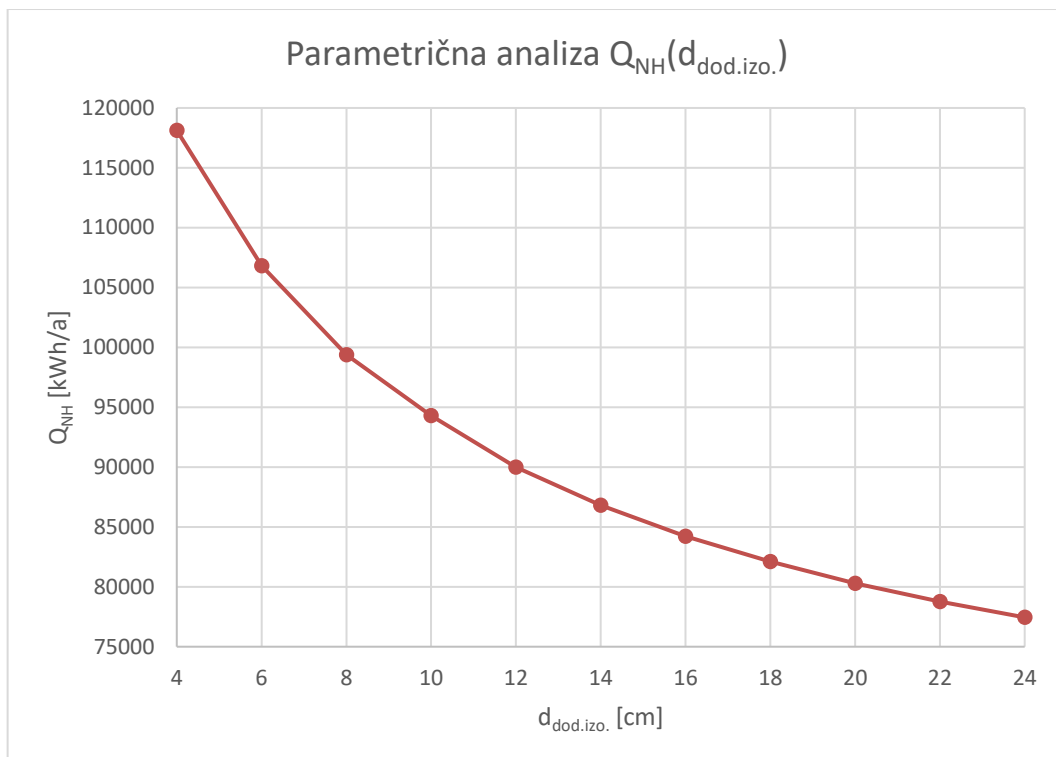
Grafikon 23: Graf parametrične analize $Q_{NH}(U_{\text{nettransparentnega ovoja}})$

Pri tej parametrični analizi Q_{NH} (grafikon 23) smo opazili, da je odvisnost od U_{ovoja} skoraj popolnoma premo sorazmerna, kar je glede na postopke izračuna seveda pričakovano. Nekolikšno odstopanje od tega lahko pripišemo dejstvu, da pri parametrični analizi nismo spreminjali nobenih drugih parametrov, torej lastnosti tal na terenu, transparentnih površin, prezračevanja, notranjih virov in ostalih parametrov.



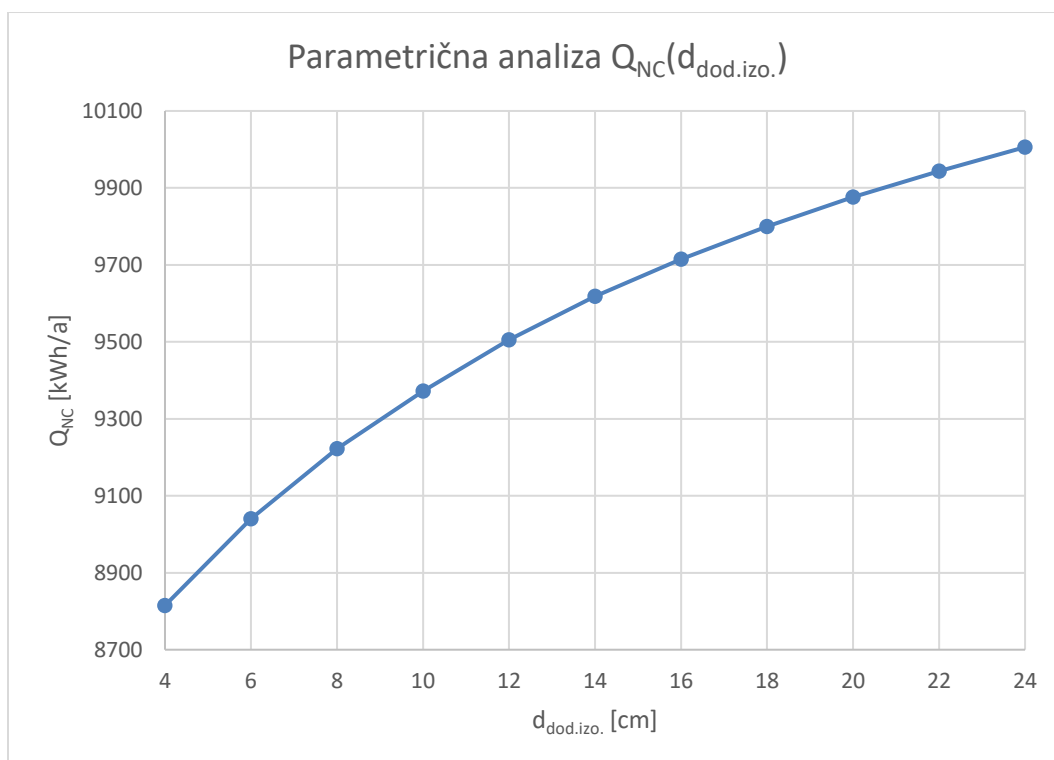
Grafikon 24: Graf parametrične analize $Q_{NC}(U_{\text{netransparentnega ovoja}})$

Pri parametrični analizi Q_{NC} (grafikon 24) premo sorazmerna odvisnost ni več tako izrazita, je pa odvisnost obratna kot v primeru Q_{NH} : potrebna količina hladu torej narašča v odvisnosti od manjše toplotne prehodnosti netransparentnega dela ovoja stavbe.



Grafikon 25: Graf parametrične analize $Q_{NH}(d_{dod.izo.})$

Pri parametrični analizi Q_{NH} (grafikon 25), kjer smo opazovali odvisnost potrebne količine toplote v odvisnosti od debeline vgrajene dodatne toplotne izolacije $d_{dod.izo.}$, smo opazili, da odvisnost ni premo sorazmerna, temveč se stopnja padanja zmanjšuje. To pomeni, da dodatni sloj debeline 2 cm izolacije ne povzroči enakih prihrankov pri energiji, v kolikor dodatno izolacijo vgrajujemo na slabo izolirano stavbo ali dobro izolirano stavbo. Na primer ob povečanju debeline izolacije za 6 cm, torej s 4 cm na 10 cm, se potrebna toplota zmanjša za 20,2 %, ob povečanju s 10 cm na 16 cm se zmanjša za 10,7 %, ob povečanju s 16 cm na 22 cm pa le za 6,5 %.



Grafikon 26: Graf parametrične analize $Q_{NC}(d_{dod.izo.})$

Tudi pri parametrični analizi Q_{NC} (grafikon 26) v odvisnosti od $d_{dod.izo.}$ smo opazili, da odvisnost ni premo sorazmerna. V tem primeru, ko vrednosti naraščajo z debelino vgrajene dodatne izolacije, gradient funkcije pada. Vidimo, da več toplotne izolacije pomeni več potrebnega hladu v poletnem času, vendar je količina potrebnega hladu na letni ravni precej manjša od količine potrebne toplote.

4.3 Zasnova zaščitnih konstrukcij in konstrukcijskih sklopov

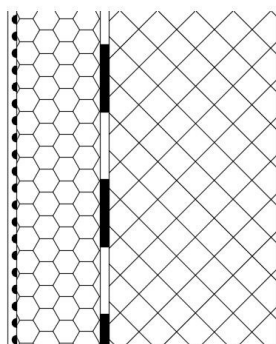
Za odpornost na zunanje vplive, energetska učinkovitost in trajnost stavbe je bistvena primerna zasnova toplotne izolacije, hidroizolacije ter zvočne izolacije, torej zaščitnih konstrukcij, ki bodo notranje okolje primerno in učinkovito ločevale in ščitile pred zunanjim. Glede na obstoječe stanje smo za posamezne konstrukcije in stavbne elemente zasnovali rešitve, ki bodo zagotovile boljšo energetska učinkovitost stavbe ter njeno trajnost. Ker je nosilna konstrukcija stavbe ploskovna (ekso skeletna) in ker je tudi obstoječe stanje tako izvedeno, smo toplotni ovoj stavbe načrtovali na zunanji strani na vseh površinah. Ustrezno hidroizolacijo zagotavljamo s finalnim slojem konstrukcijskih slojev, bodisi s fasadnim ometom bodisi s strešno kritino. Posebno pozornost smo namenili tudi izvedbi hidroizolacije ob stiku zunanje stene in terena ter hidroizolaciji stene pod terenom.

4.3.1 Tla na terenu

Za konstrukcije tal na terenu smo ocenili, da so v dobrem stanju, v večjem delu kleti so bile konstrukcije namreč pred nekaj leti poškodovane, ko je bližnji vodotok Lokavšček poplavlil okolico in zalil spodnjo etažo. Takrat so tla obnovili, prav tako so obnovili tudi stavbno pohištvo. Glede na to, da so zaključni sloji novi in v dobrem stanju in da ni prisotnih nikakršnih težav, ki bi kazale na pomanjkljivosti in napake v konstrukciji tal na terenu, poleg tega je tudi toplotna izolativnost konstrukcije ustrezna, smo se odločili, da v to konstrukcijo ne posegamo.

4.3.2 Stena proti terenu

Hidroizolacijo in tudi toplotno izolacijo vgradimo do spodnjega roba pasovnega temelja, da preprečimo prehod toplote proti zunanosti. Pomembno je, da hidroizolacijo izvedemo pravilno in od spodnjega roba pasovnega temelja do višine vsaj 30 cm nad terenom (v tem primeru neposredno na nosilno konstrukcijo, da preprečimo vstop vlage v konstrukcijo). Toplotno izolacijo zaščitimo z zaščitno bradavičasto folijo, na mestih, kjer bo urejena drenaža pa še z gramoznim nasutjem za drenažo in filcem, priporočljiva je izvedba filtracije v dveh slojih, da ne pride do zablatitve. Pri odstranjevanju obstoječih zaščitnih konstrukcij na tem delu pazimo, saj je glede na dokumentacijo na nekaterih delih možnost, da je še vedno vgrajena valovita kritina (t. i. *salonitka*), ki vsebuje azbest. Za toplotno izolacijo smo izbrali ekstrudiran polistiren ali XPS, ki je zaradi svoje zaprtocelične strukture najprimernejši za konstrukcije, kjer obstaja verjetnost stika z vlago, debelina izolacije je 10 cm, s čimer dosežemo $U_{\text{stene proti terenu}} = 0,262 \text{ W/m}^2\text{K}$ (slika 27).



Zunanja stena proti terenu

- Teren
- Bradavičasta zaščitna folija
- XPS
- Bitumenska folija
- AB nosilna stena
- Tankoslojni omet

Slika 27: Zasnova konstrukcijskega sklopa zunanje stene proti terenu

Ob sanaciji fasade in ostalih zunanjih površin moramo načrtovati tudi nekatera ostala dela, na primer nove žlebove, vertikale ipd. Istočasno s sanacijo stene proti terenu in fasade izvedemo tudi sanacijo obrobne pasu okoli stavbe, pri čemer vgradimo ustrezno izolacijo oboda temeljev, zaščito in drenažo, kjer je potrebno namestimo peskolove in poskrbimo za ustrezno odvodnjavanje.

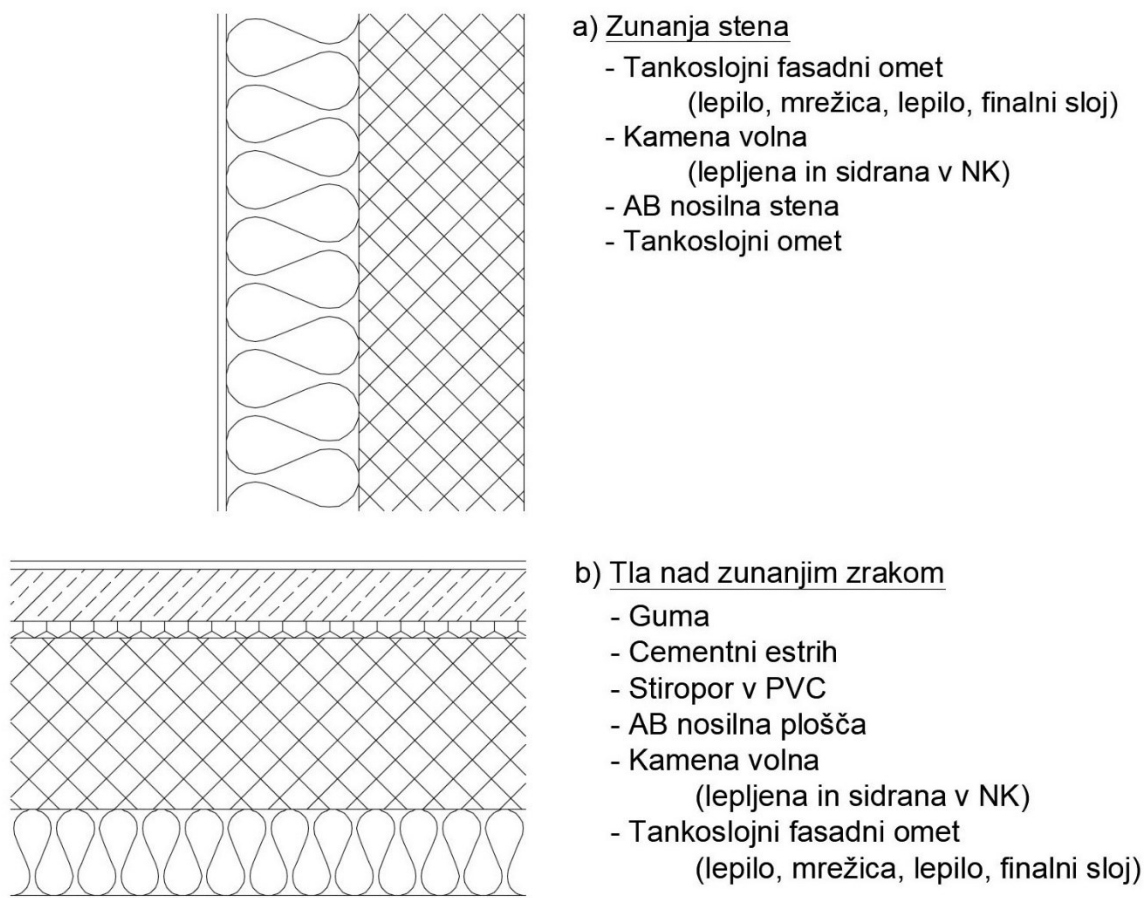
Na območje zaklonišča ne posegamo, saj prostor ni ogrevan in ni v uporabi. Poleg tega bi bili ukrepi tehnično zelo težko izvedljivi, obseg dela pa preobsežen glede na predviden učinek ukrepov.

4.3.3 Zunanja stena in tla nad zunanjim zrakom

Pri energetske sanaciji zunanje stene načrtujemo enotno rešitev tega konstrukcijskega sklopa, kar je v nasprotju z obstoječo izvedbo, kjer je del fasade izveden s klasičnim ometom, del fasade pa je prezračevan, pokrit z plastificirano aluminijasto trapezno pločevino.

Za vse fasadne površine energetsko načrtujemo klasično kontaktno izolativno fasado. Vso obstoječo fasadno izolacijo odstranimo, saj je celotna v slabem stanju in predvsem na severnih straneh povsem dotrajana. Pri zasnovi novega fasadnega konstrukcijskega sklopa moramo zagotoviti predvsem vodoodbojnost finalnega sloja in odpornost toplotne izolacije na vlago, predvsem na severni strani. Pri vgrajevanju toplotne izolacije je potrebno uporabiti sidra, ki ne povzročajo izrazitega nastanka točkovnih toplotnih mostov. Finalni sloj fasade izvedemo v dveh barvah, da sledimo obstoječi arhitekturni zasnovi.

Za toplotno izolacijo ovoja namestimo izolacijo iz kamene volne, ki ima $\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$. Ta material smo izbrali zaradi primernih lastnosti – ustrezne toplotne izolativnosti, negorljivosti, vodoodbojnosti, po podatkih proizvajalca je zdravstveno in ekološko neoporečen, vgradnja takega materiala pa je primerna tako za novogradnje kot sanacije (Knauf Insulation, 2018). Načrtujemo toplotno izolacijo debeline 16 cm ($U = 0,210 \text{ W/m}^2\text{K}$) (slika 28 a), pri tleh nad zunanjim zrakom vgradimo izolacijo v debelini 12 cm ($U = 0,236 \text{ W/m}^2\text{K}$) (slika 28 b). Debeline izolacije smo določili na podlagi izpolnjevanja omejitev toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov, ozirali pa smo se tudi na rezultate parametrične analize debeline dodatne toplotne izolacije. Finalni zaščitni sloj sestavljajo štirje sloji: lepilna malta, plastificirana steklena mreža, lepilna malta in zaključni sloj. S celotnim fasadnim sistemom tako zagotovimo ustrezno toplotno izolacijo, hidroizolacijo in zvočno izolacijo, kot tudi odpornost proti vetru (burji) in mehansko zaščito konstrukcijskega sklopa ter ustrezen estetski zunanji izgled konstrukcije in stavbe kot celote.



Slika 28: Zasnove konstrukcijskih sklopov zunanje stene in tal nad zunanjim zrakom

Izvedli smo še kontrolno analizo zvočne izolirnosti tako za sanirano zunanjo steno kot tudi za sanirana tla nad zunanjim zrakom, na istem primeru karakteristične učilnice, kot je opisan predhodno v nalogi. Rezultati analize so prikazani v spodnjih preglednicah 25 in 26.

Preglednica 25: Rezultati kontrolne analize zvočne izolirnosti za zunanjo steno

Zahtevana izolirnost ($R'_{w,f} + C_{tr,f}$)	26 dB
Izračunana izolirnost R'_w	30 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

Preglednica 26: Rezultati kontrolne analize zvočne izolirnosti za tla nad zunanjim zrakom

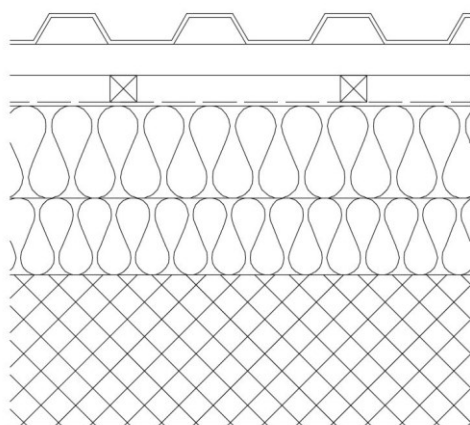
Zahtevana izolirnost ($R'_{w,f} + C_{tr,f}$)	27 dB
Izračunana izolirnost R'_w	53 dB
Ustreznost zaščite	Ustreza

Ugotovimo, da oba obravnavana konstrukcijska sklopa (pričakovano) ustrezata zahtevani

izolirnosti. Vrednost zvočne izolirnosti zunanje stene je tudi po sanaciji enaka (30 dB), medtem ko se vrednost zvočne izolirnosti tal nad zunanjim zrakom poveča za 1 dB: iz 52 dB na 53 dB.

4.3.4 Streha

Pri sanaciji strehe odstranimo obstoječo pločevinasto trapezno kritino, ob tem natančno in celovito ocenimo stanje obstoječega toplotnega ovoja in obstoječe podkonstrukcije, na katero je bila nameščena kritina. V kolikor sta v dobrem stanju, ju ohranimo, ter nanju namestimo dodatne lesene letve, med katere namestimo dodatno toplotno izolacijo. Preko izolacije namestimo paropropustno–vodonepropustno membrano, ki bo omogočila sušenje morebitnega nastalega kondenza. Sledijo še letve za pritrditev nove trapezne pločevine, letve so nameščene v prečni in vzdolžni smeri (slika 29), tako je omogočeno strujanje zraka in s tem izsuševanje kondenza, zajem zraka je na spodnjem robu strehe, izpust pa v slemenu. Kritina mora biti odporna na vse vremenske razmere, predvsem na točo in seveda na močan veter, ki predstavlja največjo nevarnost, posebno pozornost zato namenimo tudi ustrezni pritrditvi kritine. Priporočljivo je, da ima pločevina protikondenzni obrizg. Tudi toplotni ovoj na strehi načrtujemo z izolacijo iz kamene volne ($\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$), kameno volno smo za streho izbrali zaradi že omenjenih primernih lastnosti – ustrezne toplotne izolativnosti, negorljivosti ter vodoodbojnosti (Knauf Insulation, 2018). V primeru dobrega stanja obstoječega toplotnega ovoja namestimo dodatnih 16 cm izbrane toplotne izolacije, ki jo vgradimo med letve dimenzij 16/8 cm. Debelino izolacije smo tudi v tem primeru določili v skladu s predpisanimi omejitvami in rezultati parametrične analize. Dosegli smo ustrezno toplotno prehodnost $U = 0,153 \text{ W/m}^2\text{K}$. Skupaj z sanacijo strehe in fasade je potrebno namestiti tudi nove žlebove in odtočne vertikale.



Streha

- Trapezna pločevina
- Letve (prečne in vzdolžne)
- Paropropustna folija
- Kamena volna (nova TI)
- Tervol (obstoječa TI)
- AB nosilna plošča

Slika 29: Zasnova konstrukcijskega sklopa strehe

V primeru, da sta obstoječa toplotna izolacija na strehi in podkonstrukcija v preslabem stanju,

ju odstranimo ter namestimo novo toplotno izolacijo iz kamene volne v debelini 24 cm med lesene letve ustreznih dimenzij, konstrukcijski sklop nato zaključimo analogno zgoraj opisani zasnovi. V tem primeru dosežemo toplotno prehodnost $U = 0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$. V kolikor pa bi ob dodatnih natančnejših ogledih ugotovili, da so problemi puščanja in zamakanja le posledica lokalnih nepravilnosti v kritini, se lahko naknadno odločimo, da te napake z ustrezno izvedbo odpravimo lokalno, ohranimo kritino in zunanjo toplotno izolacijo ter dodatno izolacijo ustrezno namestimo neposredno na notranjo stran strehe in pri tem pravilno umestimo parno zaporo. V takem primeru bi lahko zaradi križanj obstoječe nosilne konstrukcije prišlo do negativnih vplivov toplotnih mostov, ki jih bi bilo potrebno ustrezno reševati.

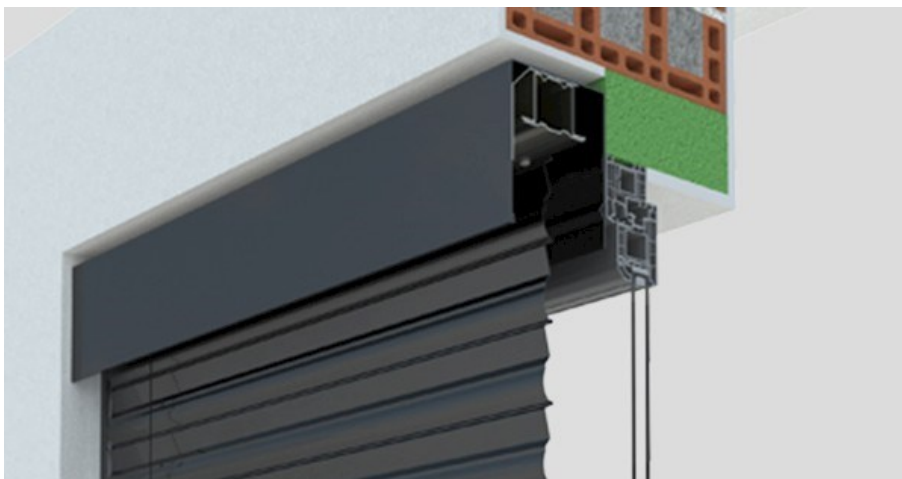
4.3.5 Notranje delitve

V poglavju 2.3.1 smo preverili stanje in ustreznosti notranjih delitev ter ugotovili, da ne ustrezajo zahtevam glede toplotne prehodnosti konstrukcij. Kljub temu smo se odločili, da teh površin ne bomo dodatno izolirali, saj se tudi manj ogrevani in neogrevani prostori nahajajo znotraj toplotnega ovoja oziroma jih skoraj v celoti obdajajo prostori ogrevane cone. V kolikor pa bi prišlo do spremembe namembnosti prostorov, torej razlik v ogrevani temperaturi ali urnikih ogrevanja, predlagamo dodatno toplotno izolacijo v skladu z zahtevami zakonodaje. Izjema so vrata na prehodu v sosednje objekte, ta zamenjamo s takimi, ki ustrezajo omejitvi toplotne prehodnosti $U_{\max} = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, hkrati pa ocenjujemo, da morajo ustrezati tudi zahtevam glede na študijo požarne varnosti objekta, ki ni predmet obravnave te naloge.

4.4 Zasnova transparentnih površin

4.4.1 Zunanja okna na fasadnih površinah

Kot smo ugotovili v poglavju 5.3.2, obstoječe zunanje zasteklitve ustrezajo zahtevam glede omejitve toplotne prehodnosti in so v dobrem stanju, zato jih ohranimo. Ker pa so obstoječa senčila nameščena na notranji strani, ne zagotavljajo ustrezne zaščite pred direktnim sončnim sevanjem za preprečevanje pregrevanja. Izbrali smo zunanje žaluzije z nadometno izvedbo (slika 30), torej z vidno masko, ki je nameščena nad obstoječa okna. Zaželeno je namestitev motoriziranih senčil, najbolje pa tudi avtomatizacija za učinkovito preprečevanje pregrevanja v poletnem času in varnost pred vetrno obremenitvijo v času burje. Pri vgradnji senčil je potrebno detajl izvesti tako, da se prepreči nastanek toplotnega mostu za nadometno škatlo.



Slika 30: Primer nadometne namestitve škatle zunanjih žaluzij (Roltek, 2018)

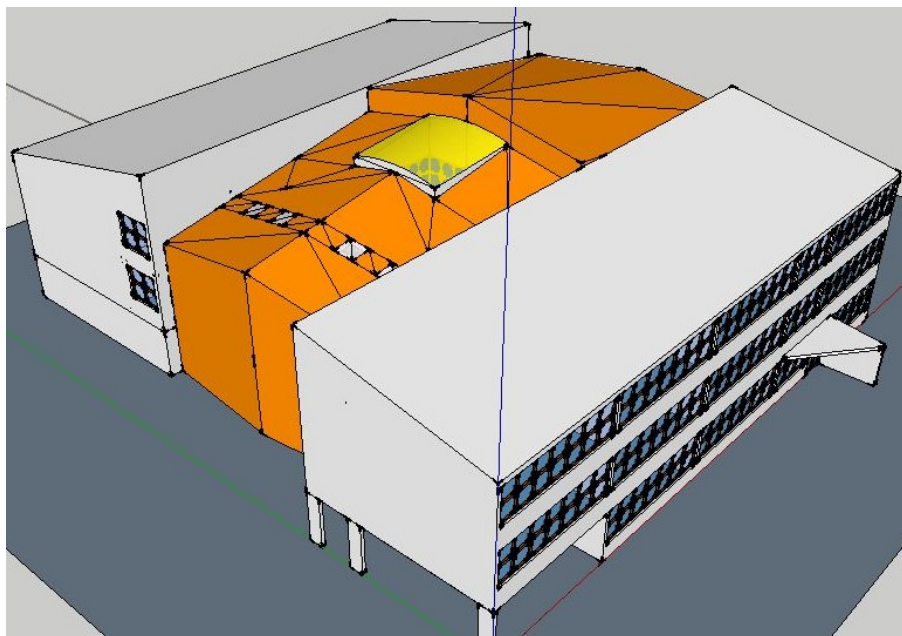
V kombinaciji z zunanjimi senčili se za regulacijo dnevne svetlobe lahko uporabijo obstoječa notranja senčila. Po potrebi se lahko dodatno načrtuje nova, na primer screen rolo senčila.

4.4.2 Pokriti atrij

Nad atrijem je izvedena streha, ki jo sestavljajo plastične plošče iz polikarbonata, ki so pritrjene na kovinsko konstrukcijo. Ugotovili smo, da obstoječa konstrukcija ne zagotavlja ustrezne toplotne izolativnosti, poleg tega pa pogosto prihaja do puščanja ob močnejših nalivih. Odločili smo se zamenjati obstoječo kritino z novo prozorno polikarbonatno kritino debeline 32 mm, s toplotno prehodnostjo do $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, 60 % prepustnostjo dnevne svetlobe in g-faktorjem sončnih dobitkov 0,77 (DS Smith, 2018). Taka kritina bo dovolj odporna na veter in točo, hkrati tudi dovolj toplotno izolativna in bo omogočala prehod večjega dela dnevne svetlobe kot obstoječa. Nosilno podkonstrukcijo kritine ohranimo, razen če bo ob izvajanju menjave kritine ugotovljeno, da je ta v slabem stanju, v tem primeru zamenjamo tudi nosilno podkonstrukcijo.

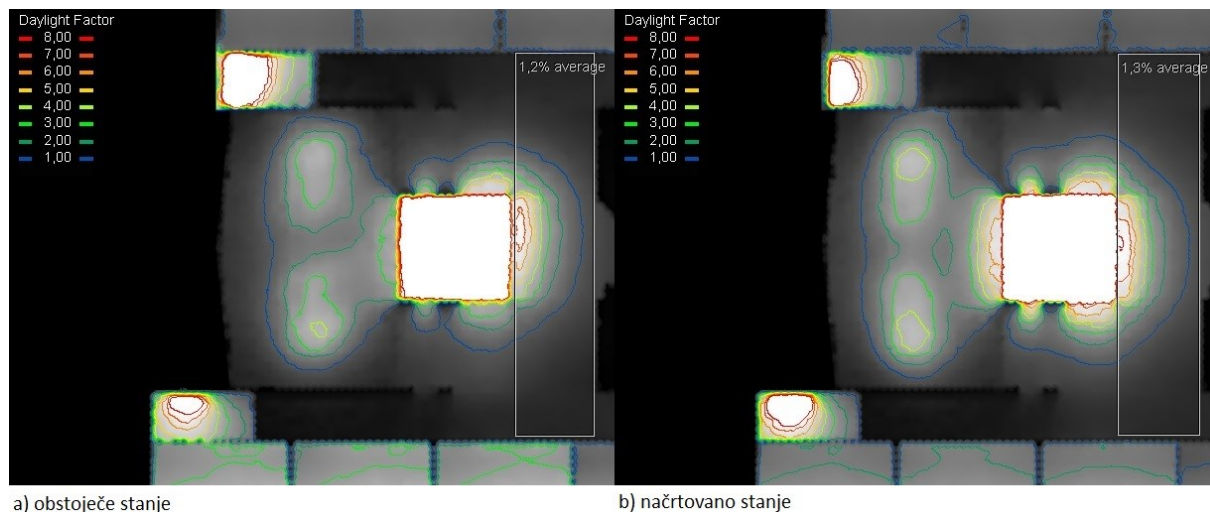
Ker predstavlja pokriti atrij glavni vir dnevne svetlobe jedru stavbe v nadstropju, medetaži in deloma tudi pritličju stavbe, smo se odločili analizirati vpliv kritine oziroma njenega faktorja prepustnosti svetlobe na osvetljenost nadstropja in medetaži. Za potrebe analize smo v programu SketchUp izdelali model stavbe (slika 31), ki smo ga uvozili v programsko orodje Velux Daylight Visualizer 3, ki ga ponuja eden od vodilnih proizvajalcev strešnih oken v Evropi – podjetje Velux. Vsem definiranim površinam in zasteklitvam smo pripisali ustrezne predpostavljene materialne in optične lastnosti, ki jih program zahteva. Analizirali smo model obstoječega stanja (s polikarbonatno kritino nad atrijem) in model načrtovanega stanja. Predpostavili smo, da obstoječa polikarbonatna kritina prepušča 40 % dnevne svetlobe, medtem ko smo v drugem primeru upoštevali 60 % prepustnost dnevne svetlobe kritine. Z

izjemo kritine in njenih lastnosti sta modela identična, prav tako tudi nastavitve za analizo dnevne osvetljenosti.



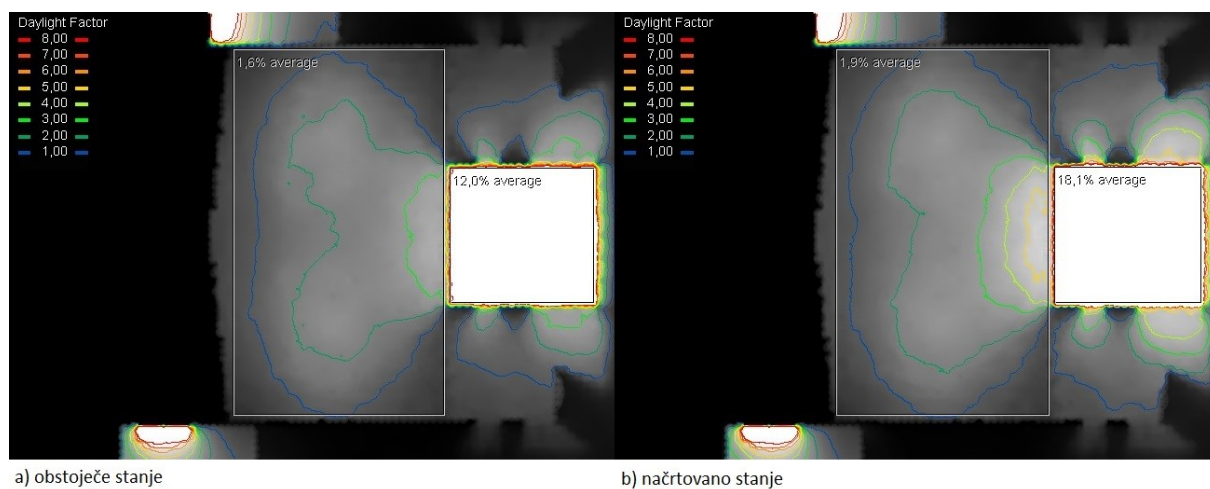
Slika 31: SketchUp model za analizo v programu Velux Daylight Visualizer 3

Dnevno osvetljenost nadstropja smo analizirali na modelski višini 7,2 m oziroma 60 cm nad tlemi nadstropja, dnevno osvetljenost medetaže pa smo analizirali na modelski višini 5,6 m oziroma 60 cm nad tlemi medetaže. Za nekoliko nižjo višino analize nad tlemi smo se odločili, ker se v teh prostorih, z izjemo knjižnice in čitalnice v medetaži, uporabniki zadržujejo le med odmori in tu ne opravljajo dela ter tako ne potrebujejo delovnih površin – miz na standardni višini. Oba modela smo analizirali za prikaz koeficienta dnevne svetlobe – KDS (angleško: *Daylight Factor – DF*). Za enoten prikaz rezultatov in lažjo primerjavo so rezultati vseh analiz prikazani s konturami od 1 % do 8 % KDS, v nadstropju opazujemo območje desno od atrija (hodnik), na medetaži pa površino atrija samega ter prostor levo od atrija (knjižnica in čitalnica). Analiza koeficienta dnevne svetlobe je smiselna, saj podaja razmerje med notranjo in zunanjo osvetljenostjo, ne pa točnih podatkov, na primer v luksih. Dosežene vrednosti smo ocenili in komentirali s primerjavo z enim od kriterijev metode ocenjevanja BREEAM, ki postavlja spodnjo mejo KDS na 2 % na 80 % površine prostora (BREEAM, 2018). V našem primeru smo opazovali delež prostora, ki pa ni enak 80 % površine, saj je bodisi večji v primeru knjižnice in čitalnice bodisi manjši pri hodniku.



Slika 32: Primerjava analiz KDS v nadstropju

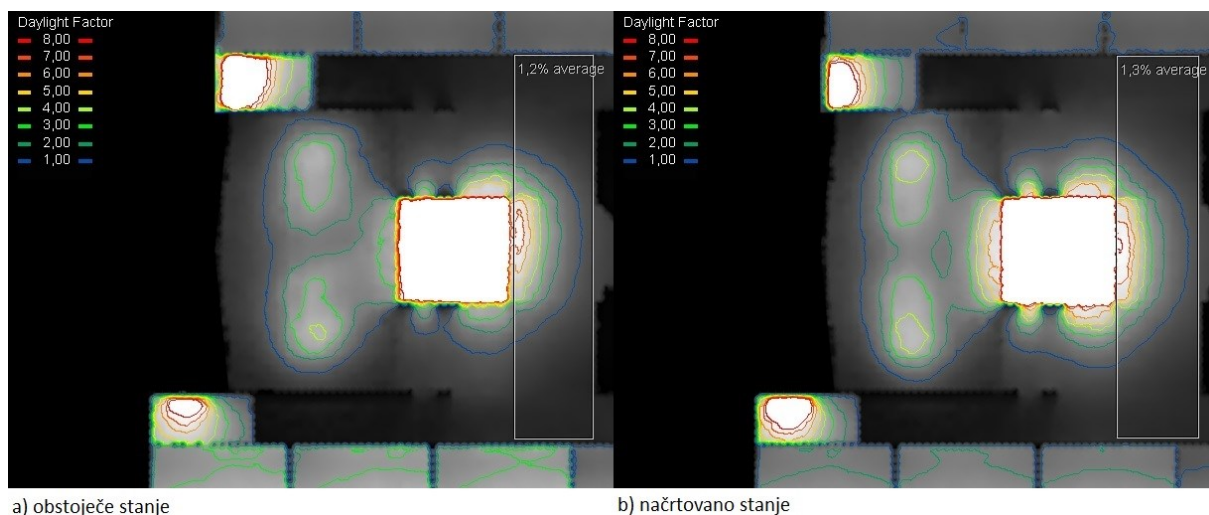
Dosežena povprečna KDS sta v obeh primerih manjša od 2 % (slika 32), je pa opazna minimalna razlika, saj se ob sanaciji in povečanju deleža dnevne svetlobe, ki ga atrijska kritina prepušča (iz ocenjenih 40 % na 60 %) KDS na obravnavani površini nadstropja dvigne za 0,1 %: iz 1,2 % na 1,3%. Če opazujemo zgolj konture, je opazen zamik vseh kontur nekoliko globlje v prostor, dosežene pa so tudi višje vrednosti tik ob atriju.



Slika 33: Primerjava analiz KDS na medetaži

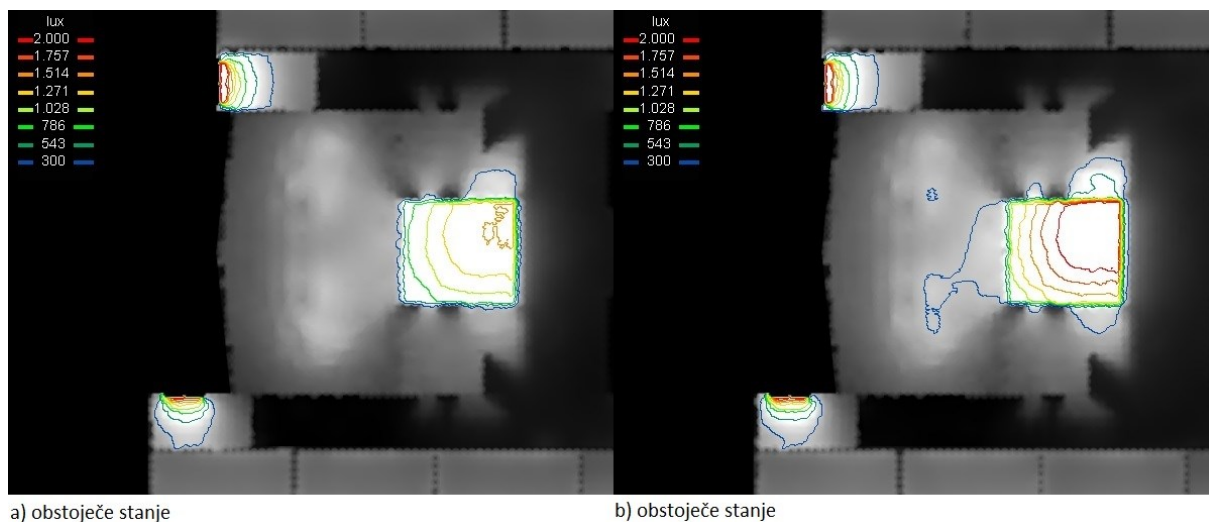
Pri analizi v medetaži (slika 33) smo za obstoječe stanje v knjižnici in čitalnici dobili povprečno vrednost KDS 1,6 % in 12,0 % v atriju samem. Pri načrtovanem stanju so bile vrednosti višje, in sicer 1,9 % v knjižnici in čitalnici ter kar 18,1 % v atriju. Pri obeh primerih so vrednosti KDS v atriju precej visoke, saj se lahko pri vrednostih od 5 % naprej pojavi bleščanje in v nekaterih primerih tudi pregrevanje. Glede na to, da je ta prostor namenjen rastlinjaku in se v njem uporabniki ne zadržujejo dolgo, višje vrednosti ne predstavljajo posebnih težav.

Analizirali smo tudi ekstremni primer, in sicer primer s sončnim vremenom na 21. junij, da bi lahko bolj celostno ocenili in analizirali atrij, morebitne težave z bleščanjem in pregrevanjem ter temu po potrebi primerno prilagodili inženirske ukrepe. Za lažjo oceno smo rezultate analize prikazali v luksih z ustrezno prilagojeno skalo – rezultati tako niso direktno primerljivi s tistimi iz prejšnjih analiz. Predpostavili smo sončno nebo, da bi prišli do ekstremnih vrednosti zaradi direktnega sončnega sevanja v atrij.



Slika 34: Primerjava analiz dnevne osvetljenosti v ekstremnem primeru v nadstropju

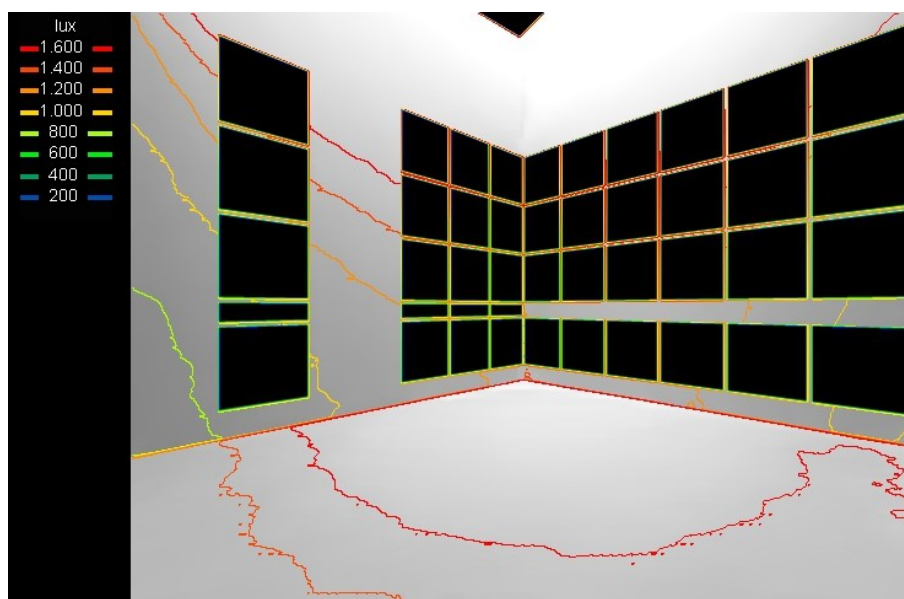
Na sliki 34 so prikazani rezultati analiz dnevne osvetljenosti v nadstropju, zato opazujemo le območje hodnika desno od atrija. Opazili smo, da tudi pri analizi načrtovanega stanja osvetljenost hodnika ne preseže vrednosti 1000 luksov, ta vrednost je dosežena le na samem robu atrija. Pri obstoječem stanju pa so zabeležene vrednosti še nekoliko nižje, do 800 luksov. Težav zaradi bleščanja v nadstropju tako ni pričakovati.



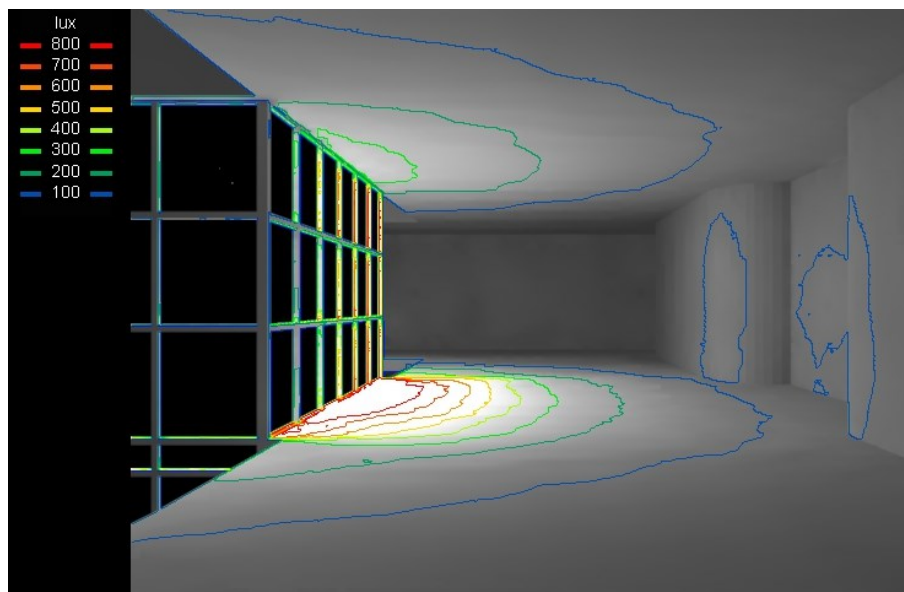
Slika 35: Primerjava analiz dnevne osvetljenosti v ekstremnem primeru na medetaži

Na medetaži (slika 35) so v ekstremnem primeru pri obstoječem stanju na majhni površini dosežene vrednosti preko 1500 luksov, kar že lahko pomeni težave zaradi pregrevanja in bleščanja v poletnem času. Pri analizi načrtovanega stanja so te vrednosti še višje, saj na dobri četrtini površine atrija dosežemo vrednosti preko 2000 luksov. Kot smo že omenili pri analizi KDS, bleščanje in pregrevanje v atriju ne pomenita velikih težav, saj je ta prostor praviloma namenjen rastlinjaku in občasnemu zadrževanju ljudi, ne pa študiju ali delu.

Z analizo in primerjavo z izhodiščnim primerom smo ugotovili, da obstaja razlika med obstoječim in načrtovanim stanjem. Večja razlika je predvsem na medetaži, kjer smo s kritino, ki prepušča več dnevne svetlobe, bolje izkoristili potencial za osvetljenost knjižnice in čitalnice, pa tudi atrija samega z dnevno svetlobo. Osvetljenost hodnika v nadstropju z dnevno svetlobo je pri novi kritini le občutek boljša, predvsem zaradi manjših zastekljenih površin, ki mejijo hodnik in atrij, ter zaradi razmerja višine in globine prostora. Za boljši prikaz stanja po načrtovanih ukrepih smo izdelali še vizualizaciji osvetljenosti z dnevno svetlobo v atriju (slika 36) in na hodniku (slika 37).



Slika 36: Vizualizacija osvetljenosti atrija z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)



Slika 37: Vizualizacija osvetljenosti hodnika z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)

Kot smo že omenili, lahko iz študije ekstremnega primera sklepamo, da obstaja pri načrtovanemu stanju v poletnem času verjetnost bleščanja in tudi pregrevanja predvsem v atriju samem. Zaradi nevarnosti pregrevanja načrtujemo namestitev notranjih senčil, na primer sistem rolo senčil, nameščen horizontalno, taka senčila bodo pripomogla tudi k zmanjšanju bleščanja in prekomerne osvetljenosti. Za prečevanje pregrevanja bi bila primernejša zunanja senčila, ki pa so pri obstoječi zasnovi kritine zaradi ukrivljenosti površine težje izvedljiva. Vpliv namestitve senčil na potrebno količino hladu Q_{NC} smo preverili tudi računsko na osnovi modela, opisanega v poglavju 4.5. Ugotovili smo, da v predvidenem saniranem stanju brez senčil Q_{NC} znaša 6630 kWh/a, ob implementaciji senčil iz tkanine 1248 kWh/a, če pa bi uporabili netransparentno kritino bi Q_{NC} znašal le še 712 kWh/a. Uporaba netransparentne kritine je glede na rezultate analize osvetljenosti z dnevno svetlobo nesmiselna, rezultati primerjave primerov z in brez senčil pa kažejo na to, da so senčila praktično nujna, saj se količina potrebnega hladu zmanjša kar za 81 %.

4.4.3 Svetlobne kupole nad knjižnico

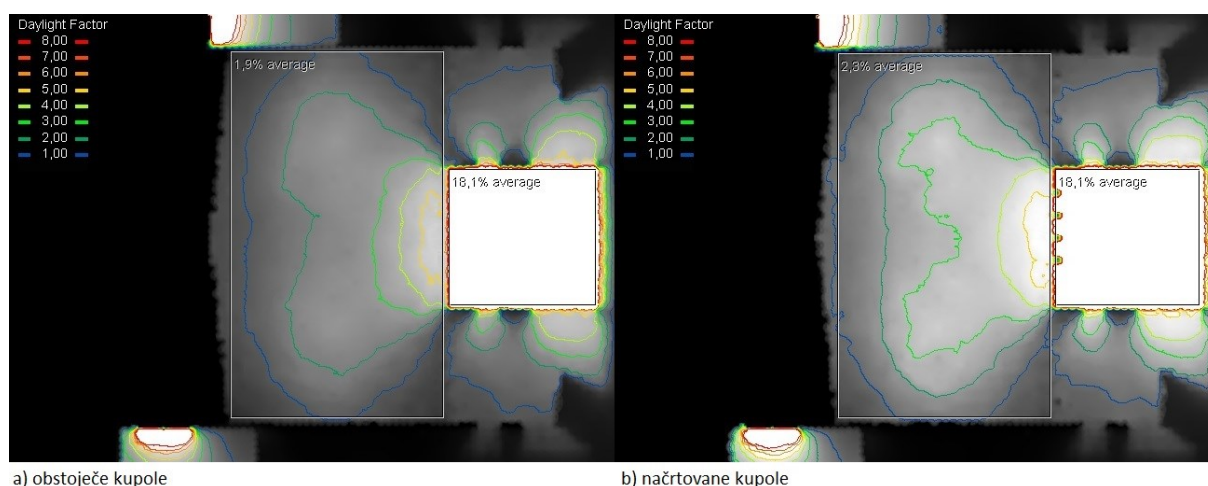
V sklopu celostne energijske sanacije strehe smo se odločili zamenjati tudi obstoječe svetlobne kupole nad knjižnico. Kupole bi bile mogoče ustrezne glede na omejitve toplotne prehodnosti (česar zaradi nepoznavanja vgrajenega materiala in izvedbe ne moremo potrditi), kljub temu smo se odločili, da jih zamenjamo. Pri analizi dnevne osvetljenosti na medetaži smo opazili dodaten vpliv svetlobnih kupol na strehi knjižnice, zabeležili smo vrednosti KDS preko 2 %, kar bi lahko z bolj prosojno kupolo še izboljšali. Izbrali smo sistem strešnega okna za ravne strehe s prosojno kupolo (slika 38). Sistem združuje prosojno kupolo iz akrila ali

polikarbonata, termo izolativno dvoslojno zasteklitev in izolativen PVC okvir na notranji strani. Naklon strehe obravnavane stavbe je na mestu kupol $13,9^\circ$ (izbrano okno je namenjeno vgradnji pri naklonih strehe do 15°). Izbrani sistem omogoča tudi namestitev zunanjih senčil na solarni pogon za preprečevanje pregrevanja. Toplotna prehodnost izbranega sistema je $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($U_{\max} = 2,40 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Velux, 2018). Izbrana kupola skupaj z zasteklitvijo prepušča 72 % dnevne svetlobe, torej več kot trenutno vgrajena kupola, ki po naši oceni prepušča okrog 40 % (Pogorevc, D., 2018). Z vgradnjo novih kupol smo poleg toplotne izolativnosti želeli izboljšati tudi osvetljenost knjižnice in čitalnice z dnevno svetlobo.



Slika 38: Prosojna kupola nad strešnim oknom za ravno streho (Velux, 2017)

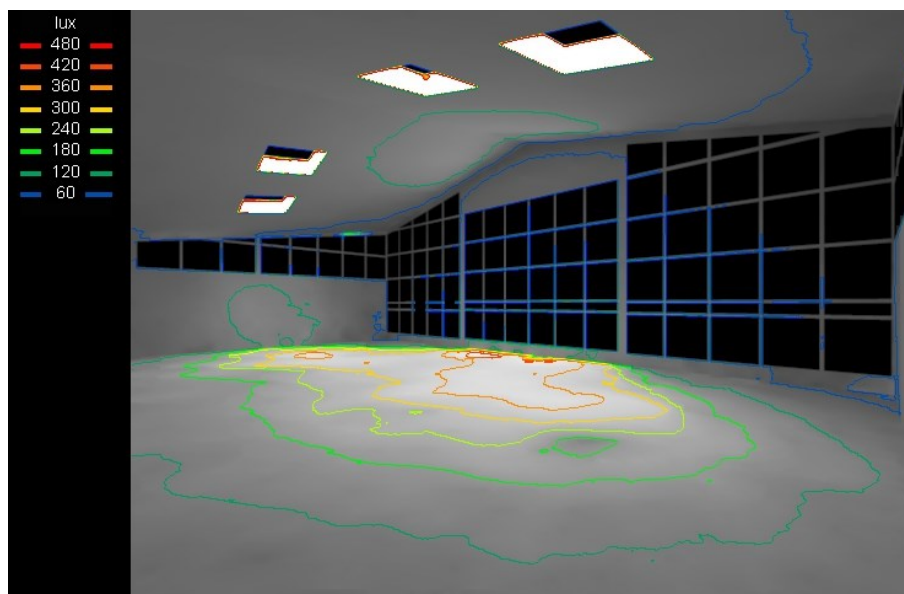
Izvedli smo analizo in primerjavo obstoječe situacije dnevne osvetljenosti v knjižnici ob zamenjavi kritine nad atrijem s situacijo ob vgradnji predlaganih kupol. Tudi v tem primeru smo analizirali KDS za obe situaciji, opazovali pa smo le rezultate analize v knjižnici in čitalnici.



Slika 39: Primerjava analiz KDS na medetaži

Ob analizi in primerjavi osvetljenosti knjižnice pred in po zamenjavi svetlobnih kupol (slika 39) opazimo precejšno spremembo: nivo povprečnega KDS se v prostoru dvigne iz 1,9 % na 2,3

%, kar presega najmanjšo dovoljeno mejo 2,0 %. Sprememba je precej opazna tudi glede na konture, saj je na skoraj celotni površini KDS vsaj 1,0 %, površina, ki je imela prej KDS 2,0 %, ga ima sedaj skoraj v celoti 3,0 %. Sklepamo lahko torej, da je zamenjava svetlobnih kupol poleg izboljšane toplotne izolativnosti tudi zaradi izboljšanja stanja osvetljenosti z dnevno svetlobo upravičena. Pozitiven učinek je presenetljiv tudi zaradi razmeroma majhne površine zasteklitve. Za boljši prikaz stanja po načrtovanih ukrepih smo izdelali še vizualizaciji osvetljenosti z dnevno svetlobo v knjižnici in čitalnici (slika 40).



Slika 40: Vizualizacija osvetljenosti knjižnice in čitalnice z dnevno svetlobo (21. junij, delno oblačni tip neba)

5 ANALIZA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

5.1 Določitev toplotnih con

V skladu s TSG-1-004: 2010 smo v programu KI Energija 2014, v katerem smo objekt analizirali, obravnavanemu objektu določili dve toplotni coni: prva je kondicionirana in vključuje učilnice, kabinete, pisarne, knjižnico in ostale kondicionirane prostore, druga, nekondicionirana, vključuje atrij, hodnike in stopnišča. Delitev je potrebna, saj največja cona obsega 71,2 % stavbe, torej manj kot 80 %, kar bi zadostovalo, da bi celotno stavbo upoštevali kot enotno cono. Druga toplotna cona, ki vključuje atrij, hodnike in stopnišča, se nahaja znotraj toplotnega ovoja, torej to cono glede na točko (1) poglavja 9.2.3 v TSG upoštevamo kot kondicionirano. Podatki o conah, ki smo jih uporabili pri analizi, so prikazani tudi v preglednicah 27 in 28. Geometrijske podatke smo pridobili na podlagi dokumentacije in načrtov, ki smo jih imeli na voljo. Podatke o notranji temperaturi in vlažnosti smo predpostavili na podlagi vrednosti, ki jih narekuje Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Predpostavili smo notranjo temperaturo 20 °C pozimi in 26 °C poleti. Na podlagi istega pravilnika smo predpostavili tudi število izmenjav zraka, te vrednosti smo predpostavili različno za obe coni, in sicer za toplotno cono 1 smo predpostavili 0,5 izmenjav zraka na uro, ko so prostori zasedeni (predpostavimo, da so zasedeni 16 ur dnevno), in 0,2 izmenjav zraka na uro, ko v prostorih ni uporabnikov; za toplotno cono 2, ki vsebuje hodnike in ostale prostore, kjer se ljudje ne zadržujejo, pa smo predpostavili enotno vrednost 0,2 izmenjav zraka na uro. To vrednost smo se odločili v poletnem času povečati na 0,5 izmenjave na uro v času zasedenosti objekta analogno toplotni coni 1, saj smo opazili, da povečano prezračevanje v poletnem času prispeva k zmanjšanju potrebnega hladu. Prispevek notranjih virov po poenostavljeni metodi znaša za stanovanjske stavbe, šole in podobne objekte 4 W/m². Masivnost gradnje smo definirali kot težko gradnjo, saj vso nosilno konstrukcijo predstavljajo ploskovni armiranobetonski elementi.

Preglednica 27: Podatki o toplotni coni 1

Toplotna cona 1 (učilnice)	Ogrevana cona
Neto ogrevana prostornina	7238,4 m ³
Neto uporabna površina	2285,9 m ²
Površina učilnic	1560,4 m ²
Notranja temperatura pozimi	20 °C
Notranja temperatura poleti	26 °C
Notranji viri pozimi	4 W/m ²

Se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 27

Notranji viri poleti	4 W/m ²
Masivnost gradnje	Težka gradnja
Vlažnost	65 %
Prezračevanje	Naravno prezračevanje
Izmenjave zraka pozimi*	n = 0,4 h ⁻¹
Izmenjave zraka poleti*	n = 0,4 h ⁻¹

* Količina izmenjave zraka je variabilna glede na urnik zasedenosti.

Preglednica 28: Podatki o toplotni coni 2

Toplotna cona 2 (hodniki)	Ogrevana cona
Neto ogrevana prostornina	2676 m ³
Neto uporabna površina	925,8 m ³
Notranja temperatura pozimi	20 °C
Notranja temperatura poleti	26 °C
Notranji viri pozimi	4 W/m ²
Notranji viri poleti	4 W/m ²
Masivnost gradnje	Težka gradnja
Vlažnost	65 %
Prezračevanje	Naravno prezračevanje
Izmenjave zraka pozimi	n = 0,2 h ⁻¹
Izmenjave zraka poleti*	n = 0,4 h ⁻¹

* Količina izmenjave zraka je variabilna glede na urnik zasedenosti.

5.2 Zunanje konstrukcije

Pri analizi smo uporabili konstrukcijske sklope in njihove lastnosti, ki smo jih opisali in analizirali v prejšnjih poglavjih. Površine smo razdelili glede na orientacije in jih pripisali pripadajoči coni. Pri vnosu zasteklitev smo upoštevali ocenjene lastnosti, opisane v poglavju 5.3.2. Faktor okvirja smo predpostavili na 0,7, upoštevali smo tudi zunanja senčila (žaluzije) ter notranje zavesе. Pri nekaterih zasteklitvah smo vnesli tudi potrebne podatke o senčenju zaradi sosednjega objekta. Tudi zasteklitve smo razdelili glede na orientacijo in jih pripisali ustrezni coni, v kateri se nahajajo.

5.3 Toplotni mostovi

Ocenili smo, da s pregledom objekta in s primerjavo dejanskega stanja s projektno dokumentacijo ni mogoče natančno opredeliti in analizirati toplotnih mostov. Od same izgradnje je bilo zamenjano stavbno pohištvo, ki ga v sanaciji ohranjamo, zato sklepamo, da so detajli ustrezno izvedeni in imajo tako vsi toplotni mostovi v stavbi linijsko toplotno prehodnost $\psi_e < 0,2 \text{ W/mK}$. To pomeni, da lahko v skladu s TSG njihov vpliv upoštevamo na poenostavljen način s povečanjem toplotne prehodnosti celotnega ovoja stavbe za $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.4 Notranje konstrukcije

V program smo vnesli podatke o notranjih konstrukcijah, torej podatke o armiranobetonskih in opečnatih stenah, ki ločujejo prostore učilnic, kabinetov in pisarn od hodnikov, ter podatke o medetažnih konstrukcijah.

5.5 Sistemi

Obravnavani objekt je tako kot fizično tudi sistemsko povezan s sosednjim objektom dijaškega doma. Toploto za obe stavbi generira specialni dvostopenjski plinski kotel Buderus z močjo $1,2 \text{ MW}$. Generator skrbi tako za ogrevanje kot tudi za pripravo tople sanitarne vode v ogrevalni sezoni, v neogrevalni sezoni pa za pripravo tople sanitarne vode šole skrbi električni bojler. Hladilni sistem šole predstavlja izmenjevalec toplote, ki je vgrajen na podstrešju. V prostorih so nameščeni ventilatorski konvektorji, ki skrbijo za ogrevanje in hlajenje. Razvod je štiricevni, dve cevi sta namenjeni ogrevanju, dve pa hlajenju. Amfiteatralna predavalnica nima možnosti naravnega prezračevanja, zato je opremljena s sistemom za prezračevanje brez možnosti rekuperacije toplote.

Odločili smo se, da za potrebe analize porabe energije v programu KI Energija uporabimo privzete podatke, ki nam jih program ponudi glede na tip generatorja toplote in glede na ostale lastnosti sistemov, ki smo jih definirali. Za ta korak smo se odločili, ker nimamo vseh podatkov o obstoječih sistemih, ki so implementirani v stavbi, in ker si stavba generator toplote za ogrevanje in za pripravo tople sanitarne vode deli z objektom dijaškega doma, zaradi česar so dejanske vrednosti zelo težko določljive. Glede na uporabnost prostorov v toplotni coni 2, ki zajema hodnike in ostale povezovalne prostore, smo v tej coni pri definiciji sistema priprave tople sanitarne vode predpostavili, da v tej coni ta sistem ne deluje.

Na obravnavanem objektu ni implementiran noben sistem za izrabo obnovljivih virov energije,

z izjemo zajema direktnega sončnega sevanja v ogrevalni sezoni (zimskem času).

5.6 Rezultati

Pri izračunih in kontroli rezultatov gradbene fizike smo predpostavili, da stavba v poletnem času dva meseca, julija in avgusta, ni v uporabi. Podatke, ki smo jih uporabili za izračun kazalnikov energetske učinkovitosti stavbe, smo pridobili s programom KI Energija 2014. Z analizo gradbene fizike in s tem pridobljenimi rezultati smo ugotovili, da znaša potrebna toplota za ogrevanje obravnavane stavbe po predvideni prenovi 24 kWh/m²a, kar stavbo uvršča v energijski razred B1. Koeficient specifičnih transmisijских toplotnih izgub skozi površino toplotnega ovoja stavbe, ki ga izračunamo s pomočjo izraza $H'_T = H_T/A$, v našem primeru znaša 0,390 W/m²K. Predpisana omejitev za ta koeficient je $H'_T \leq 0,28 + T_L/300 + 0,04/f_o + z/4 = 0,450$ W/m²K, za povprečno temperaturo zunanjega zraka $T_L = 9,8$ °C, faktor oblike $f_o = 0,37$ m⁻¹ in brezdimenzijsko razmerje med površino oken oziroma gradbenih odprtín in površino toplotnega ovoja stavbe $z = 0,117$. Velja torej $H'_T = 0,390$ W/m²K $\leq$ 0,450 W/m²K in stavba izpolnjuje pogoj. Letna potrebna toplota za ogrevanje stavbe Q_{NH} , ki jo preračunamo na enoto kondicionirane prostornine stavbe V_e , znaša $Q_{NH}/V_e = 6,22$ kWh/m³a. Omejitev za javne stavbe, ki jo izračunamo z izrazom $0,29 (45 + 60 f_o - 4,4 T_L)$ znaša 6,98 kWh/m³a. Neenačba $Q_{NH}/V_e = 6,22$ kWh/m³a $\leq$ 6,98 kWh/m³a velja, torej stavba izpolnjuje tudi ta pogoj, kot tudi zahtevo po omejitvi potrebne primarne energije za delovanje stavbe $Q_p/A_u = 118,4$ kWh/m²a $\leq$ Q_p/A_u dovoljeno = 165,5 kWh/m²a. Rezultati so prikazani v preglednici 29.

Preglednica 29: Rezultati izračuna gradbene fizike za obdobje ogrevanja

Transmisijske izgube	107 473 kWh/a
Izgube zaradi prezračevanja	76 028 kWh/a
Dobitki notranjih virov	58 410 kWh/a
Dobitki sončnega sevanja	53 629 kWh/a
Toplota za gretje (Q_{NH})	77 116 kWh/a
H'_T	0,390 W/m²K
Q_{NH}/V_e	6,22 kWh/m³a

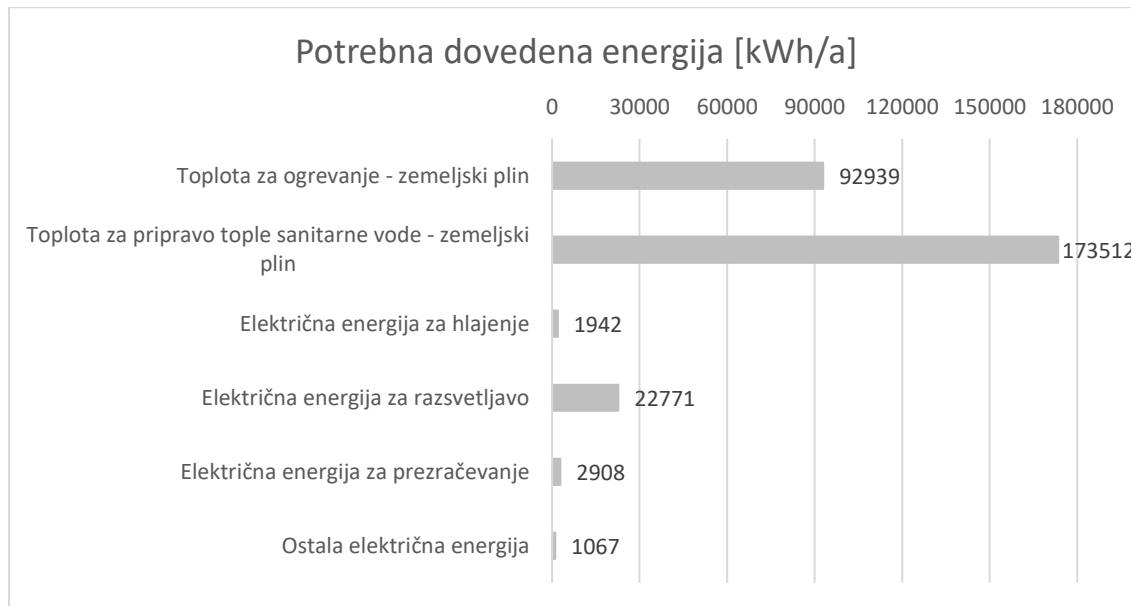
Ugotavljamo torej, da stavba izpolnjuje zahteve za energijsko učinkovitost, kar pomeni, da smo ukrepe celostne energijske sanacije načrtovali ustrezno. Izvedli smo tudi primerjavo z obstoječim stanjem, primerjava je prikazana v preglednici 30. Ugotovili smo, da se ob upoštevanju načrtovanih ukrepov transmisijske izgube zmanjšajo za 64 719 kWh/a oziroma 37,6 %, toplota za gretje Q_{NH} za 58 947 kWh/a oziroma 43,32 %, koeficient specifičnih

transmisijskih toplotnih izgub H'_T za $0,205 \text{ W/m}^2\text{K}$ oziroma $34,5 \%$ in Q_{NH}/V_e za $7,67 \text{ kWh/m}^3\text{a}$ oziroma za $55,2 \%$. Potrebna toplota za ogrevanje stavbe v izhodiščnem stanju (t.j. pred prenovo) je $42 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, kar stavbo uvršča v energijski razred C.

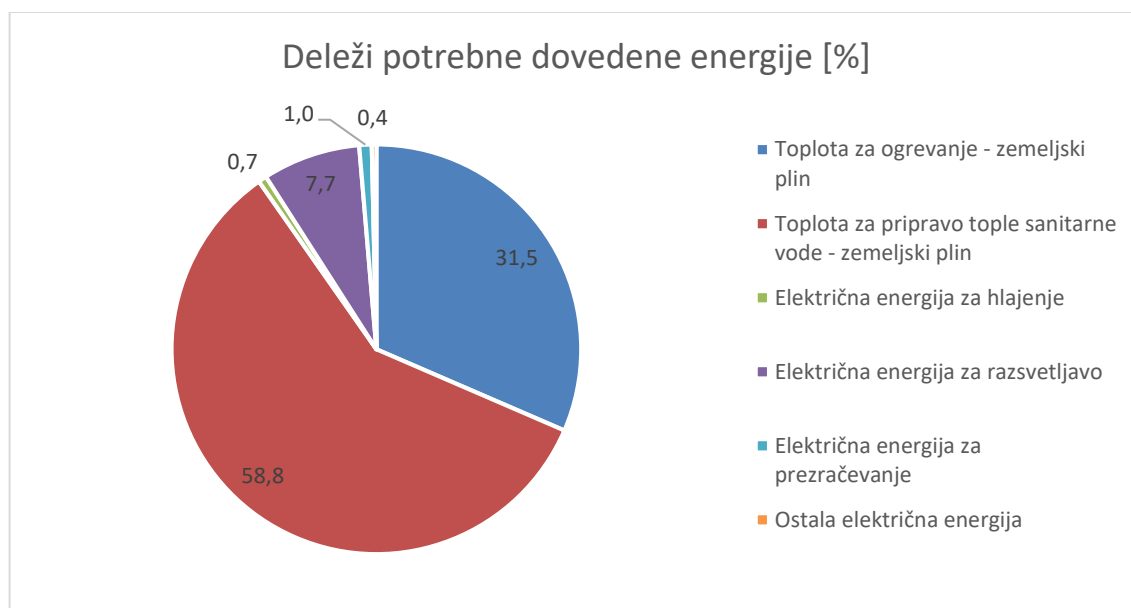
Preglednica 30: Primerjava rezultatov analize obstoječega in saniranega stanja

	Obstoječe	Sanirano	Razlika	
Transmisijske izgube	172192 kWh/a	107473 kWh/a	64719 kWh/a	37,6 %
Toplota za gretje (Q_{NH})	136063 kWh/a	86351 kWh/a	58947 kWh/a	43,3 %
H'_T	$0,595 \text{ W/m}^2\text{K}$	$0,390 \text{ W/m}^2\text{K}$	$0,205 \text{ W/m}^2\text{K}$	$34,5 \%$
Q_{NH}/V_e	$13,89 \text{ kWh/m}^3\text{a}$	$6,22 \text{ kWh/m}^3\text{a}$	$7,67 \text{ kWh/m}^3\text{a}$	$55,2 \%$
Energijski razred	C: $42 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	B1: $24 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$18 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$42,9 \%$

Na grafikonu 41 je prikazana potrebna dovedena energija razdeljena glede na področje porabe, energijo (toploto) za ogrevanje in za pripravo tople sanitarne vode proizvajamo iz zemeljskega plina, ostala energija je električna. Na grafikonu 42 so v tortnem diagramu prikazani deleži potrebne dovedene energije glede na področje porabe.



Grafikon 41: Potrebna dovedena energija po predlagani prenovi stavbe



Grafikon 42: Deleži potrebne dovedene energije po predlagani prenovi stavbe

5.7 Potencialni dodatni ukrepi za doseganje večje energetske učinkovitosti

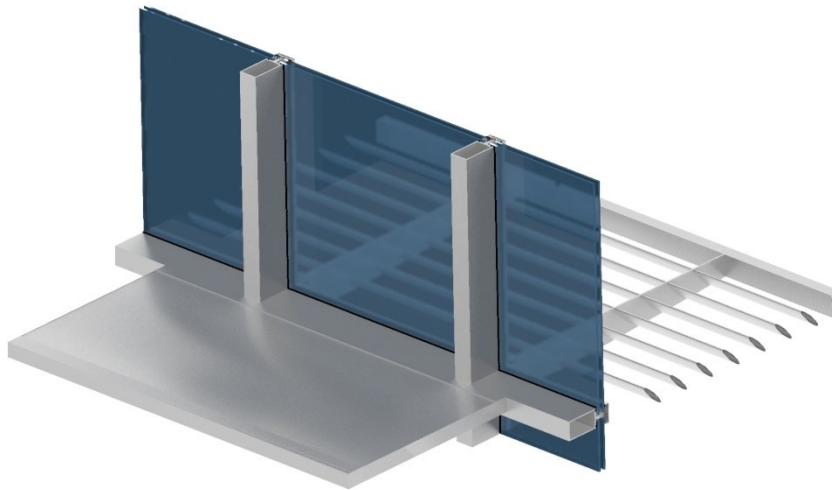
Kljub temu, da smo z načrtovanimi ukrepi izvedli ustrezno celostno energijsko sanacijo, smo pripravili nabor nekaj možnih dodatnih ukrepov za izboljšanje energetske učinkovitosti obravnavane stavbe. Ti ukrepi so smiselni za implementacijo tudi v primeru, če bi želeli stavbo sanirati v skoraj nič energijsko stavbo (SNES).

Možni dodatni ukrepi so:

- zamenjava zunanjega stavbnega pohištva,
- načrtovanje ustreznega sistema za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje,
- implementacija rabe obnovljivih virov energije na lokaciji.

Pri pregledu in oceni stanja objekta smo ocenili, da so obstoječe zunanje zasteklitve v dobrem stanju in da ustrezajo zahtevam tehnične smernice za graditev, zato sanacije teh površin nismo načrtovali. V primeru, da bi želeli še izboljšati energetsko učinkovitost, bi bila smiselna zamenjava zunanjih zasteklitev z bolj izolativno troslojno zasteklitvijo, kar bi transmisijske izgube v ogrevalni sezoni precej zmanjšalo, ta ukrep pa bi slabo vplival notranjo osvetlitev. Za primerjavo smo analizirali primer, ko bi vsa obstoječa okna zamenjali z bolj učinkovitimi s toplotno prehodnostjo $U_w = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$ (prej $U_w = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$), opazovali pa smo le transmisijske izgube v ogrevalni sezoni. Te bi padle iz 107 473 kWh/a na 96 378 kWh/a, torej za 10 %. Hkrati bi lahko načrtovali tudi naprednejši sistem senčenja z implementacijo svetlobnih polic (slika 43). Te bi s svojim zunanjim delom senčile spodnji del zasteklitve in tako preprečevale bleščanje ter večji del pregrevanja, s svojim notranjim reflektivnim delom pa

omogočale prenos svetlobe globlje v prostor, s tem bi predvsem v učilnicah na jugovzhodni strani privarčevali pri porabi energije za umetno osvetljevanje in hlajenje.



Slika 43: Primer svetlobne police (Arcadia, 2018)

Drugi ukrep, ki bi ga lahko izvedli za dodatno izboljšanje energetske učinkovitosti stavbe, je načrtovanje novih ustreznih sistemov za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje. Menimo, da bo obstoječi sistem za ogrevanje in pripravo tople sanitarne vode, v katerem toploto generira specialni plinski kotel z močjo 1,2 MW, po izvedbi celostne energijske sanacije, ki je predmet obravnave tega dela, in predvsem po pričakovani energijski sanaciji dijaškega doma (torej po energijski sanaciji obeh objektov, ki jih generator oskrbuje) ta postal močno predimenzioniran. Smiselno bi bilo implementirati učinkovit sistem, ki bi ga dopolnjevala tudi energija iz obnovljivih virov, pridobljena na lokaciji. Priporočljiva bi bila tudi zamenjava obstoječega prezračevalnega sistema amfiteatralne predavalnice z novim, ki omogoča rekuperacijo toplote. Če bi želeli porabo energije zmanjšati, bi bilo smiselno mehanski prezračevalni sistem z rekuperacijo toplote implementirati na nivoju cele stavbe. S tem bi izgube zaradi prezračevanja precej zmanjšali. Preverili smo, kako bi vplivala implementacija takega sistema na kazalce energetske učinkovitosti, predpostavili smo stopnjo prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ in 80 % učinkovitost rekuperacije toplote. S takim ukrepom bi toploto za ogrevanje Q_{NH} predvidoma več kot razpolovili; zmanjšali iz 77 116 kWh/a na 35 338 kWh/a oziroma za kar 54,2 %. Pri implementaciji takega sistema bi seveda morali paziti, da bi sistem ohranjal kakovostno in zdravo notranje okolje.

Raba obnovljivih virov je tretji potencialni ukrep, ki v povezavi s prej opisanimi ukrepi predstavlja velik potencial za doseganje zahtev, ki jih zelo verjetno prinašajo prihajajoče spremembe pravilnikov na tem področju. Raba OVE bo namreč ena glavnih zahtev prihajajočih prenovljenih pravilnikov in kot taka bistvena ob potencialni nadgradnji projekta celostne

energijske sanacije. Na objektu bi bilo smiselno implementirati toplotno črpalko vsaj za hlajenje, priporočljivo pa seveda tudi za ogrevanje objekta in pripravo tople sanitarne vode. Na severni strani stavbe so namreč travnate površine, na katerih bi lahko implementirali sistem s toplotno črpalko zemlja/voda. Površina strehe, ki je orientirana proti jugovzhodu, meri dobrih 400 m² in je zaradi orientacije primerna za namestitve bodisi fotonapetostnih panelov bodisi sončnih kolektorjev za pridobivanje toplote. Zaradi velike površine, ki je na voljo lahko seveda implementiramo oba sistema. Preverili smo, koliko električne energije bi lahko proizvedli s 100 m² vgrajenih fotonapetostnih panelov na omenjeni strehi z naklonom 15°, izračuni kažejo, da bi ta v našem primeru proizvedla 15 134 kWh električne energije v celem letu in 11 079 kWh v 10 mesecih, ko objekt obratuje.

6 ZAKLJUČEK

V magistrskem delu smo izdelali celostno energijsko sanacijo obravnavane stavbe Srednje šole Veno Pilon Ajdovščina. Obravnavana stavba je v obstoječem stanju energetsko neučinkovit objekt zato smo načrtovali več sanacijskih inženirskih ukrepov v skladu z načeli stavbarstva.

Naredili smo pregled vseh pravilnikov in zahtev, ki jih morajo stavba in njeni deli izpolnjevati in nato izvedli natančen pregled obstoječega stanja. Podatke, ki smo jih pridobili ob ogledu, smo primerjali z dokumentacijo in določili dejansko stanje. Analizirali smo konstrukcijske sklope in ocenili njihovo ustreznost glede na zahteve, ki jih moramo izpolnjevati, ter določili elemente, ki so potrebni sanacije. Preverili smo ali elementi izpolnjujejo vse zaščitne funkcije: toplotno izolacijo, hidroizolacijo in zvočno izolacijo.

Analizirali smo akustiko notranjega okolja za dva prostora na šoli, za tipično učilnico ter za amfiteatralno predavalnico, pri tem smo uporabili program ARTIE. V amfiteatralni predavalnici, kjer so imeli v preteklosti težave s predolgim odmevnim časom in so izvedli nekatere ukrepe, smo preverili, ali je stanje po ukrepih ustrezno. Pri tipični učilnici smo prav tako izvedli izračun odmevnega časa, ter določili ekvivalentno absorpcijsko površino, s katero bi stanje izboljšali.

Pred zasnovo ukrepov celostne energijske sanacije smo analizirali klimatske danosti lokacije. S parametrično analizo smo preverili odvisnost potrebnih količin toplote in hladu od toplotne prehodnosti netransparentnega dela stavbnega ovoja in od debeline dodatne toplotne izolacije netransparentnega dela stavbnega ovoja. Za kritične konstrukcijske sklope stavbnega ovoja smo zasnovali ustrezne ukrepe v skladu z veljavno zakonodajo in predhodno analizo obstoječega stanja, k načrtovanju smo pristopali celostno, s hkratnim ozirom tako na vse najpomembnejše zaščitne funkcije – toplotno izolacijo, zvočno izolacijo in hidroizolacijo, kot tudi na osvetlitev z dnevno svetlobo in druga načela stavbarstva. Pri zasnovi nove kritine nad atrijem in novih strešnih kupol nad knjižnjico smo izvedli analizo dnevne osvetljenosti izbranih prostorov. Na koncu smo izvedli še analizo energetske učinkovitosti stavbe po izvedbi vseh načrtovanih ukrepov. Nad atrijem bi bilo mogoče izvesti tudi popolnoma novo konstrukcijo s stekleno streho. Taka izvedba bi bila vizualno lepša, zaradi manjšega g-faktorja bi imeli manj težav s pregrevanjem, na zunanji strani pa bi v tem primeru lahko izvedli tudi senčila.

S končno analizo smo ugotovili, da smo z načrtovanimi ukrepi zasnovali energetsko učinkovito stavbo. Transmisijske izgube se v primerjavi z izhodiščnim stanjem zmanjšajo za 64 719 kWh/a oziroma 37,6 %. Zmanjša se tudi potrebna toplotna energija za ogrevanje Q_{NH} pa za 58

947 kWh/a oziroma 43,3 %. Dosežene so tudi zahtevane omejitve koeficienta specifičnih transmisijskih izgub H'_T in dovoljene letne potrebne toplote za ogrevanje stavbe preračunane na enoto kondicionirane prostornine Q_{NH}/V_e . Stavba je v skladu s predvideno prenovo s 24 kWh/m²a letne potrebne toplote za ogrevanje uvrščena v energijski razred B1 (v sedanjem stanju je stavba v C energiskem razredu).

K načrtovanju ukrepov energijske sanacije smo pristopali celostno, izhajali pa smo iz predpostavk o željah investitorja po smiselnih in gospodarnih ukrepih, s katerimi dosežemo zahtevano energetska učinkovitost objekta. V poglavju 5.7 pa smo izdelali nabor ukrepov, s katerimi bi učinkovitost stavbe še izboljšali. Ti ukrepi vključujejo zamenjavo transparentnega dela stavbnega ovoja, renovacijo sistemov za ogrevanje, prezračevanje in hlajenje ter implementacijo rabe obnovljivih virov energije.

Obravnavano stavbo sem izbral, ker sem to gimnazijo tudi sam obiskoval, v njej odraščal in se ob zaključku šolanja tudi odločil za poklic gradbenega inženirja. Želel sem svoje znanje, ki sem ga pridobil na fakulteti, izkoristiti in stavbi ter instituciji, ki mi je toliko dala, nekaj vrniti.

VIRI

Arcadia. 2018.

<https://www.arcadiainc.com/products/> (Pridobljeno 25. 8. 2018.)

ARHIM d. o. o., 2018. Računalniški program HRUP '13 – zaščita pred hrupom. Ljubljana, UL FGG (Pridobljeno 7. 5. 2018)

BREEAM. 2018.

https://www.breeam.com/BREEAM2011SchemeDocument/content/05_health/hea01.htm

(Pridobljeno 10. 8. 2018.)

Climate-Data.org. 2018.

<https://en.climate-data.org/location/9614/> (Pridobljeno 12. 4. 2018.)

Dovjak, M. 2017. Bivalno okolje, Izbor literature. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja)

DS SMITH. 2018.

<https://www.dssmith.com/corrugated-plastics-solutions/offering/polycarbonate-sheets>

(Pridobljeno 31. 7. 2018.)

Google Maps. 2018.

<https://www.google.com/maps> (Pridobljeno 12. 4. 2018.)

GURS. 2017. Geodetska uprava Republike Slovenije. Portal prostor.

<http://www.e-prostor.gov.si/> (Pridobljeno 11. 12. 2017.)

KI Energija 2014. 2016.

<http://www.knaufinsulation.si/program-ki-energija-2014> (Pridobljeno 17. 11. 2016.)

Knauf Insulation. 2018.

<http://www.knaufinsulation.si/proizvodi-0> (Pridobljeno 3. 8. 2018)

Košir, M. 2016. Dnevna svetloba, Izbor literature. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja)

Košir, M. 2017. Učinkovita raba energije, Izbor literature. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja)

Kunič, R. 2017. Napredni materiali, Izbor literature. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja)

MIK Celje. 2018.

<http://www.mik-ce.si/okna/pvc-okna/pvc-okna-mik/> (Pridobljeno 3. 8. 2018.)

Občina Ajdovščina. 2018.

<https://www.ajdovscina.si/novice/2017072010180069/> (Pridobljeno 1. 6. 2018.)

Pogorevc, D. 2018. Okno za ravno streho s kupolo (elektronska pošta). Poslano: Petrič, A. 8. 8. 2018. Osebna komunikacija.

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/02)

<http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4223> (Pridobljeno 8. 8. 2018.)

PURES. Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 52/10)

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV10043> (Pridobljeno 8. 8. 2018.)

ROLTEK. 2018.

<http://www.roltek.si/zunanje-zaluzije/predokenske-zunanje-zaluzije/> (Pridobljeno 6. 8. 2018.)

Rutar, T. 2016. (Učinkovita) raba energije v Sloveniji – statistični pogled. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja)

SketchUp. 2015.

<https://www.sketchup.com/> (Pridobljeno 26. 11. 2015.)

Splošno gradbeno podjetje »Primorje« Ajdovščina. 1980. Šolski center usmerjenega izobraževanja PGD.

SunHours. 2018

<https://www.sunhoursplugin.com/> (Pridobljeno 8. 8. 2018.)

Šubic, N., Kunič, R. 2018.

Računalniški program za analizo akustike notranjega okolja ARTIE. Ljubljana, UL FGG.

TSG-1-004: 2010. Tehnična smernica TSG-1-004: 2010. Učinkovita raba energije.

TSG-1-005: 2012. Tehnična smernica TSG-1-005: 2012. Zaščita pred hrupom v stavbah.

VELUX. 2018.

<https://www.velux.si/izdelki/ravna-streha> (Pridobljeno 3. 8. 2018.)

VELUX Daylight Visualizer. 2018.

<https://www.velux.com/article/2016/daylight-visualizer> (Pridobljeno 8. 6. 2018.)