



izr. prof. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.

mdovjak@fgg.uni-lj.si
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Lucija Klinc, mag. inž. grad.

lucija.klinc13@gmail.com
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



dr. Ferdinand Deželak, univ. dipl. inž. geod., dipl. inž. fiz.

ferdinand.dezelak8@sda.si
Slovensko društvo za akustiko
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Aljoša Flander, univ. dipl. inž. str., pooblaščen inženir IZS

aljosa.flander@decibel.si
Decibel, d. o. o.
Vodnikova 1 a, 5280 Idrija



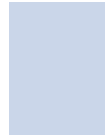
Klara Kopavnik, mag. jed. teh.

klara.kopavnik@ims.si
IMS merilni sistemi, d. o. o.
Cesta Ljubljanske brigade 23 a, 1000 Ljubljana



Peter Dolenc, dipl. oec.

peter.dolenc@ims.si
IMS merilni sistemi, d. o. o.
Cesta Ljubljanske brigade 23 a, 1000 Ljubljana



Rok Zule, dipl. inž. fiz.

rok.zule@zvd.si
ZVD Zavod za varstvo pri delu, d. o. o.
Pot k izviri 6, 1260 Ljubljana - Polje



Znanstveni članek

UDK/UDC 694.1:691:699.844

IZZIVI ZVOČNE ZAŠČITE V SODOBNI LESENI GRADNJI

SOUND INSULATION CHALLENGES IN MODERN TIMBER CONSTRUCTION

Povzetek

Prispevek obravnava študijo primera dvostanovanjske stavbe z nosilnim sistemom iz križno lepljenega lesa (CLT), pri kateri so bili analizirani raven zvočne zaščite in oblikovani predlogi za njeno izboljšanje. Cilji raziskave so obsegali eksperimentalno določitev zvočne izolirnosti zunanjih in notranjih ločilnih elementov ter ovrednotenje rezultatov glede na veljavne zahteve in priporočila, s poudarkom na obnašanju konstrukcij v nizkofrekvenčnem območju. Meritve so bile izvedene skladno s standardi ISO 16283-1, -2 in -3. Izmerjena zvočna izolirnost predelne stene med stanovanjema ($R'_w = 71$ dB) presega minimalne zahteve in potrjuje učinkovito zasnovo ter izvedbo konstrukcijskih detajlov brez izrazitih akustičnih mostov. Zvočna izolirnost fasade z oknom ($R'_w = 32$ dB) izpolnjuje predpisane mejne vrednosti, pri čemer spektralna analiza razkrije manj ugoden odziv v nizkofrekvenčnem območju, vzroka pa na podlagi izvedenih meritev ni mogoče enoznačno določiti. Medetažna konstrukcija z $L'_{n,w} = 44$ dB ustreza zahtevam za stanovanjske stavbe, vendar nizkofrekvenčni prenos ostaja značilen izziv CLT-sistemov. Iz navedenega izhaja, da visoka vrednost R'_w in nizka vrednost $L'_{n,w}$ še ne zagotavljata optimalne zvočne zaščite v vseh primerih. Rezultati potrjujejo, da je z ustreznim projektiranjem, zgodnjo vključitvijo akustičnega strokovnjaka in kakovostno izvedbo mogoče doseči visoko raven akustične učinkovitosti lesenih stavb, ugotovitve pa so uporabne tudi pri načrtovanju objektov s podobnimi konstrukcijskimi sistemi. Hkrati rezultati spektralne analize fasade kažejo, da zmanjšana zvočna izolirnost v nizkofrekvenčnem območju lahko predstavlja omejitev pri zaščiti pred zunanjimi viri z izrazitim nizkofrekvenčnim spektrom, kot so toplotne črpalke, kar je pomembno upoštevati pri nadaljnjem akustičnem načrtovanju.

Ključne besede: dvostanovanjska stavba, križno lepljen les, zvočna izolirnost, udarni zvok, zvok po zraku

Summary

This article presents a case study of a semi-detached residential building with a load-bearing system made of cross-laminated timber (CLT), in which sound insulation performance was assessed and improvement measures were proposed. The research objectives included the experimental determination of airborne and impact sound insulation of façade and internal elements, evaluation of the results against regulations and recommendations, and consideration of structural behaviour at low frequencies. Sound insulation measurements were conducted in accordance with ISO 16283-1, -2 and -3. The partition wall between the two dwellings achieved a high airborne sound insulation performance ($R'_w = 71$ dB), exceeding minimum requirements and confirming effective structural design and execution. The façade achieved an R'_w of 32 dB, satisfying the limit values; however, spectral analysis revealed a less favourable response in the low-frequency range, the cause of which could not be conclusively determined based on the measurements performed. The inter-storey floor exhibited an impact sound level of $L'_{n,w} = 44$ dB, complying with residential building requirements, while low-frequency impact transmission remains a challenge for the CLT systems. It follows from the above that a high R'_w value and a low $L'_{n,w}$ value do not necessarily guarantee optimal acoustic protection in all cases. The results show that high acoustic performance in timber buildings can be achieved through appropriate design, early involvement of an acoustic specialist, and high-quality construction. In addition, the findings indicate that the reduced low-frequency sound insulation performance of the façade may result in increased sensitivity to external low-frequency noise sources, such as heat pumps, which should be carefully considered in future acoustic design and system placement.

Key words: semi-detached building, cross-laminated timber, sound insulation, airborne sound, impact sound

1 UVOD

Kakovost notranjega okolja (indoor environmental quality, IEQ) predstavlja celovit okvir za obravnavo bivalnega in delovnega okolja v stavbah ter vključuje toplotno udobje, kakovost notranjega zraka, vizualno in nevizualno svetlobno udobje, ergonomijo in akustično udobje [Mewomo et al., 2023]. Naštetih dejavniki so med seboj soodvisni ter skupaj vplivajo na funkcionalnost prostora, zadovoljstvo uporabnikov in dolgoročno kakovost bivanja ali dela v stavbah.

Med komponentami IEQ ima zvočno okolje posebno vlogo, saj neposredno vpliva na zaznano (akustično) zasebnost, nemotenost dejavnosti ter splošno dožemanje kakovosti prostora. Nezaželeni zvoki, ki se prenašajo iz zunanega okolja, sosednjih prostorov ali tehničnih naprav prek zunanjih in notranjih ločilnih elementov ter njihovih stikov, detajlov in prebojev, zmanjšujejo zvočno zasebnost, motijo vsakodnevne dejavnosti (npr. delo, počitek ali spanje) ter znižujejo splošno zaznano kakovost bivanja [Torresin et al., 2020]. Študije v večstanovanjskih stavbah in pisarniških okoljih dosledno povezujejo hrup iz sosednjih enot, instalacij, prometa in tehničnih sistemov z večjo motenostjo dejavnosti, slabšo koncentracijo, zmanjšano zaznano zasebnostjo ter nižjim splošnim zadovoljstvom uporabnikov ([Chen et al., 2023; Andargie et al., 2023]).

Pomen ustrezne zvočne zaščite stavb kot sestavnega dela IEQ potrjujejo tudi raziskave, ki akustično udobje neposredno povezujejo z zdravjem in dobrobitjo uporabnikov ([Basner et al., 2014]; [Dovjak & Kuček, 2019]). Dolgotrajna izpostavljenost hrupu lahko negativno vpliva na kakovost spanja, povečuje tveganje za srčno-žilne bolezni ter zmanjšuje kognitivne sposobnosti, zlasti pri otrocih [WHO, 2024]. Kljub temu številne študije opozarjajo, da zakonsko predpisane minimalne zahteve za zvočno zaščito pogosto ne zagotavljajo zadovoljive ravni zaznanega akustičnega udobja uporabnikov, predvsem v zahtevnejših bivalnih okoljih [Rasmussen, 2025].

V praksi so gradbeno-akustične lastnosti stavb še vedno pogosto obravnavane kot sekundarne, kar se odraža v nezadovoljstvu uporabnikov, zlasti v večstanovanjskih in vrstnih stavbah, kjer je prenos zvoka med enotami pogost vir motenj ([Skinner & Grimwood, 2005]; [Rasmussen, 2025]). Kot posebej problematična se izkazuje prenos udarnega zvoka prek nosilnih konstrukcij ter nizkofrekvenčni hrup tehničnih sistemov ([Sato et al., 2014]; [Kim et al., 2019]; [Zou et al., 2025]).

Nizkofrekvenčni zvok se zaradi dolgih valovnih dolžin ter zmanjšane zvočne izolirnosti ločilnih konstrukcij v območju nizkih frekvenc učinkovito širi po stavbi in prodira v bivalne prostore. Pri udarnem hrupu pri tem večinoma prevladujejo prav nizkofrekvenčne komponente, zaradi česar je njegovo obvladovanje z običajnimi projektantskimi in izvedbenimi ukrepi bistveno zahtevnejše ([Cavanaugh et al., 2009]; [SDA, 2022]). Posledično zgolj doseganje predpisanih mejnih vrednosti ne zagotavlja nujno zadovoljive akustične kakovosti bivanja. Več raziskav je pokazalo, da je povezava med standardnimi ocenami udarne zvočne izolirnosti (npr. $L'_{n,w}$) in subjektivno ocenjeno nadležnosti večinoma nizka, zlasti pri lesenih medetažnih konstrukcijah, pri katerih standardni kazalniki pogosto ne zajamejo dovolj vpliva nizkofrekvenčnih komponent udarnega hrupa na zaznavo uporabnikov ([Späh, et al., 2013]; [Vrhovnik and Prislan, 2025]).

Izkušnje iz prakse in rezultati meritev kažejo, da so številne akustične pomanjkljivosti posledica neustrezne zasnove konstrukcijskih stikov (t. i. akustični mostovi) in detajlov ter pomanjkljive izvedbe, ne pa nujno uporabljenega materiala. Te težave je mogoče v veliki meri preprečiti že v zgodnjih fazah projektiranja z ustrezno arhitekturno zasnovo, premišljeno izbiro konstrukcijskih sklopov in aktivnim vključevanjem akustičnega strokovnjaka v projektno skupino. Prav z namenom izboljšanja primerljivosti in dviga kakovosti se vse pogostejše uveljavljajo podrobnejši sistemi akustične klasifikacije stavb, ki dopolnjujejo obstoječe predpisane zahteve, zlasti v širšem frekvenčnem območju ([Gösele & Schröder, 2012]; [Rasmussen, 2025]).

V sodobni gradbeni praksi je v ospredju doseganje visoke energijske učinkovitosti stavb, kar izhaja iz podnebnih zavez, zmanjševanja ogljičnega odtisa in zaostrovanja zakonodajnih zahtev. Ob tem je zvočna zaščita prepogosto obravnavana premalo sistematično kljub njenemu neposrednemu vplivu na kakovost notranjega okolja in dobro počutje uporabnikov ([IWBI, 2024]; [WHO, 2024]). Širše uveljavljanje skoraj ničenergijskih stavb ter prehod na obnovljive vire energije sta hkrati privedla do pogostejše vgradnje toplotnih črpalk, ki so lahko pomemben vir nizkofrekvenčnega hrupa v bivalnem okolju.

Lesena gradnja se je v zadnjem desetletju uveljavila kot trajnostna alternativa klasičnim gradbenim sistemom, pri čemer ima pomembno vlogo križno lepljen les (cross-laminated timber, CLT). Ta omogoča racionalno in hitro gradnjo ter prispeva k zmanjšanju okoljskega vpliva ([Karacabeyli & Douglas, 2013]; [Brandner et al., 2016]). Kljub številnim prednostim pa konstrukcije iz CLT zaradi majhne površinske mase ter togih konstrukcijskih stikov predstavljajo specifične gradbenoakustične izzive, zlasti pri prenosu nizkofrekvenčnega in udarnega zvoka.

Ta raziskava se osredotoča na analizo zvočne zaščite vrstne stanovanjske stavbe z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenega lesa (CLT). Cilji raziskave so bili eksperimentalno določiti zračno- in udarnoprenosno zvočno izolirnost zunanjih (zunanja stena) in notranjih ločilnih elementov (predelne stene, medetažne konstrukcije), ovrednotiti rezultate glede na veljavne zakonodajne zahteve in strokovna priporočila ter oblikovati predloge za izboljšave na podlagi pregleda obstoječih praks, s posebnim poudarkom na obnašanju konstrukcij pri nizkih frekvencah.

2 METODOLOGIJA

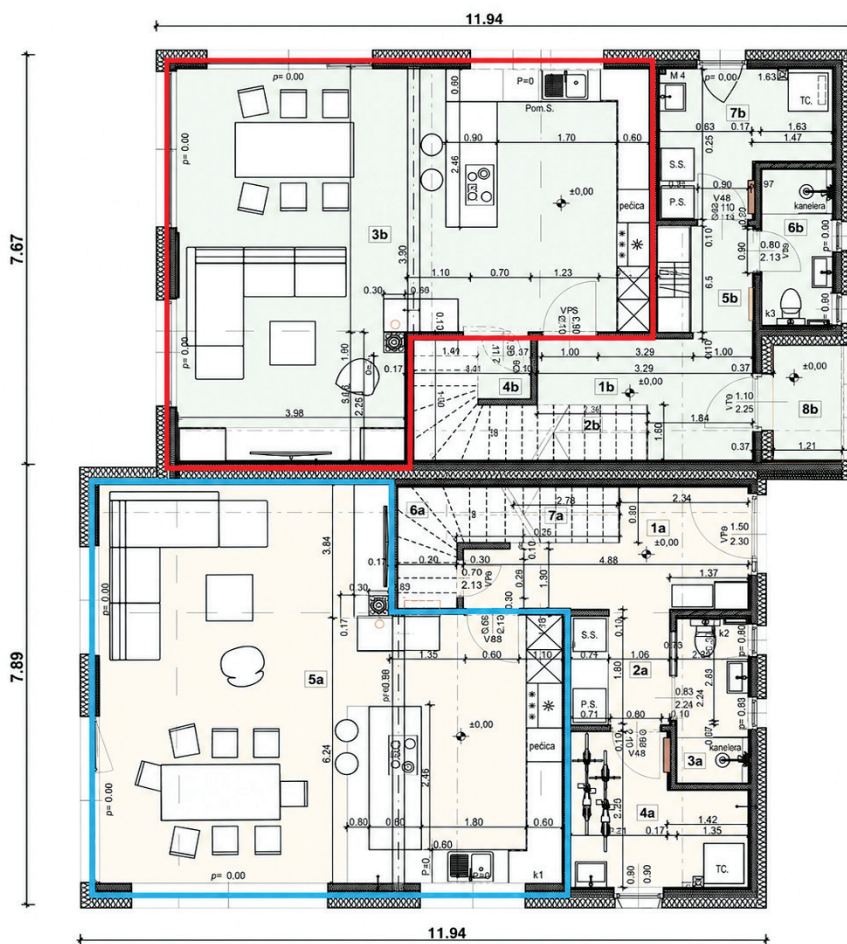
Raziskava je bila izvedena kot večstopenjski postopek za ovrednotenje zvočne zaščite obravnavane stavbe. Izvedene so bile terenske meritve (i) zvočne izolirnosti zunanjega ločilnega elementa (zunanja stena z oknom) in notranjega ločilnega elementa (predelna stena med enotama) ter (ii) normirane razlike zvočnega tlaka udarnega zvoka notranjih ločilnih elementov (medetažne konstrukcije) v skladu s področnimi merilnimi standardi. Izmerjeni rezultati so bili primerjani z veljavnimi nacionalnimi predpisi in strokovnimi priporočili s poudarkom na nizkofrekvenčnem območju. Dodatno je bil prikazan zvočni odtis delovanja tipične toplotne črpalke kot primer možne obremenitve stavbe z nizkofrekvenčnim hrupom. Na podlagi rezultatov so bile v zaključku oblikovane usmeritve za izboljšanje zvočne zaščite.

V tem prispevku so predstavljeni izbrani ključni rezultati raziskave, celovita analiza meritev pa je podana v magistrskem delu Klinc [2025].

2.1 Študija primera

Obravnani objekt je novozgrajena dvostanovanjska stavba – dvojček z etažnostjo pritličje in mansarda (P + M), umeščena v podeželsko okolje osrednje Slovenije. Lokacija spada v III. območje varstva pred hrupom, pri čemer so večji viri hrupa in prometno bolj obremenjena cesta oddaljeni približno 1 km. Stavba obsega dve ločeni stanovanjski enoti (A in B), zasnovani na zamaknjem pravokotnem tlorisu, kar prispeva k razgibanemu in prostorsko členjenemu volumnu. Neto tlorisna površina posamezne enote znaša 158 m², skupni neto volumen celotne stavbe pa je približno 1040 m³. Stavba je pokrita s simetrično dvokapno streho z naklonom 35°, slame je orientirano v smeri jugozahod-severovzhod. Dostop do stavbe je urejen z dovozno potjo na severovzhodni strani, glavni vhod pa je lociran na vzhodni fasadi. Funkcionalna razporeditev prostorov sledi običajni stanovanjski zasnovi: pritlična etaža je namenjena dnevnim prostorom, mansarda pa spalnim prostorom. Nosilni sistem stavbe je izveden kot montažna lesena konstrukcija iz CLT, ki tvori nosilne zunanje in notranje stene debeline 10 cm ter medetažne plošče debeline 16 cm. Zuna-

nja stena je večslojna in sestavljena iz notranje mavčno-kartonske obloge (GKF), inštalacijske ravnine z vmesno izolacijo, nosilne CLT-plošče, kontaktne fasadne toplotne izolacije iz kamene volne ter zaključnega sloja z armirno mrežico in fasadnim ometom. Skupna debelina zunanega stenskega sklopa znaša 44 cm. Predelna stena med stanovanjskima enotama je zasnovana kot dvojna, medsebojno akustično ločena sendvič konstrukcija, optimizirana za doseganje visoke ravni zvočne izolirnosti med stanovanjskima enotama. Sestavljena je iz več zaporednih slojev, ki vključujejo mavčno-kartonske plošče (GKF), elastično izolacijo NDA Ecorubber, dodatne GKF-obloge z bandažiranimi stiki, inštalacijsko ravnino s kovinskimi obešali in vmesno akustično izolacijo, plast izolacije iz plute, nosilno CLT-steno, dvoplastno izolacijo iz kamene volne z vmesnim zračnim slojem, drugo CLT-steno ter dodatno inštalacijsko ravnino z izolacijo in zaključnima oblogama iz mavčno-kartonske plošče in plošče Rigips DUOTECH RB. Skupna debelina te ločilne konstrukcije znaša približno 61 cm. Medetažna konstrukcija je sestavljena iz talne obloge (parket ali keramika), cementnega estriha s sistemom talnega gretja na ločilni foliji, toplotne izolacije iz EPS, nosilne CLT-plošče debeline 16 cm ter spodnje podkonstrukcije z ognjevarnimi mavčno-kartonskimi ploščami, ki so zaključene z bandažiranjem stikov in končnim opleskom. Skupna debelina medetažnega sklopa znaša približno 46 cm.



Slika 1. Tloris pritličja stanovanjske enote A z oznakami oddajnega (modra) in sprejemnega (rdeča) prostora, ki sta bila uporabljena v meritvah fasade

2.2 Meritve zvočne izolirnosti notranjih ločilnih elementov

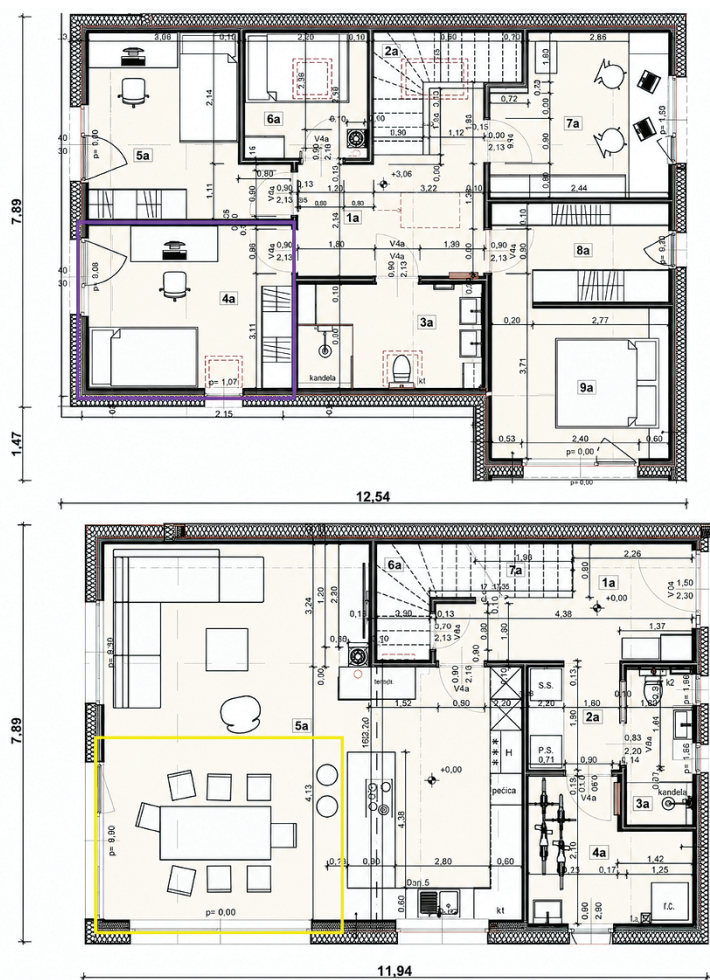
2.2.1 Predelna stena med enotama

Za potrebe merjenja zvočne izolirnosti stene med enotama A in B smo uporabili standard SIST EN ISO 16283-1 [SIST EN ISO, 2014], ki opredeljuje metode merjenja zvoka v zraku. Oddajni prostor je bivalni del stanovanjske enote A (modra), sprejemni prostor pa bivalni del stanovanjske enote B (rdeča) (slika 1). V času izvedbe meritev je bila enota A v celoti dokončana in vseljena, medtem ko je bila enota B v 4. gradbeni fazi, brez zaključnih oblog in opreme. Zvočni vir (dodekaeder) je bil postavljen v oddajni prostor (enota A). Merilni mikrofoni na stojalu je bil pomikan med več pozicijami, oddaljenimi od sten in meja prostora. Izvedenih je bilo osem meritev v izvornem in osem meritev v sprejemnem prostoru. V oddajni prostor smo zvočnik postavili na dve različni lokaciji, enako v sprejemnem prostoru, skupno torej štiri premike. Razdalja med posameznimi pozicijami zvočnika je bila najmanj 0,7 m, kot navaja standard. Na podlagi izmerjenih ravni zvoka v obeh prostorih in časa odmeva je programska oprema izračunala standardizirane parametre (D_n , D_{nT} , R').

2.2.2 Medetažna konstrukcija

Meritve so bile izvedene v skladu s standardom SIST EN ISO 16283-2 [SIST EN ISO, 2020], ki določa postopke za in situ merjenje udarnega zvoka. Standard je prilagojen dejanskim razmeram v stavbah in je namenjen prostorom z volumnom med 10 m^3 in 250 m^3 ter frekvenčnemu območju od 50 Hz do 5000 Hz.

Oddajni prostor (vijolična) je eno etažo nad sprejemnim prostorom (rumena) (slika 2). Pomembno je poudariti, da so bile meritve zvočne izolirnosti medetažne konstrukcije izvedene izključno v stanovanjski enoti A, zato so bili prostori za merjenje izbrani le znotraj navedene stanovanjske enote. Za generiranje udarnega zvoka smo uporabili standardiziran udarni vir (mehanski tapkalni stroj), nameščen v zgornjem prostoru, ki smo ga premaknili na pet različnih položajev, oddaljenih vsaj 0,5 m od robov konstrukcije. Za vsak položaj mehankega tapkalnega stroja smo v sprejemnem prostoru izvedli dve meritvi zvočnega tlaka z mikrofonom na stojalu, skupno torej deset meritev. Pri vsaki meritvi so bili upoštevani čas odmeva, hrup ozadja in geometrija prostora. Rezultati so bili izraženi za indeksi L'_n in L'_{nT} , ki omogočata primerjavo z zahtevami za zvočno udobje v stanovanjskih objektih. Zaradi zaščite parketa sta bili dve meritvi opravljeni z mehanskim tapkalnim strojem, nameščenim na preprogi, tri meritve pa na odeji.



Slika 2. Tloris mansarde stanovanjske enote A z oznakami oddajnega (vijolična) in sprejemnega (rumena) prostora, ki sta bila uporabljena v meritvah zvočne izolirnosti medetažne konstrukcije

2.3 Meritve zvočne izolirnosti zunanjih ločilnih elementov

Meritve zvočne izolirnosti fasade so bile izvedene v skladu s standardom SIST EN ISO 16283-3 [SIST EN ISO, 2016], ki določa in situ postopke merjenja zvočnega tlaka za fasadne elemente in celotne fasade. Standard je prilagojen dejanskim razmeram v stavbah in velja za prostore s prostornino med 10 m^3 in 250 m^3 ter za razširjeno frekvenčno območje od 50 Hz do 5000 Hz. Rezultati meritev omogočajo kvantitativno oceno in primerjavo zvočne izolirnosti v opremljenih in neopremljenih prostorih. Oddajni prostor sta zelenica in terasa stanovanjske enote A (rumena), sprejemni prostor pa bivalni del stanovanjske enote A (zelena) (slika 3). Kot zvočni vir je bil uporabljen dodekaeder tipa 4292-L in ojačevalnik moči tipa HBK 2755. Zaznavanje in zapisovanje meritev je omogočil merilnik ravni zvoka tipa HBK 2255, opremljen z mikrofonom tipa 4966-Z-041 s podaljškom UA-0049, ki je bil postavljen na stojalo UA-0801, ter kalibratorjem 4231. Merilnik je bil povezan z aplikacijo Building Acoustics, nameščeno na mobilni telefon, preko katere se je izvajalo upravljanje in proženje posameznih meritev.

Pri interpretaciji frekvenčnih rezultatov je treba razlikovati med merilnim frekvenčnim območjem, obravnavanim v standardih serije SIST EN ISO 16283 [SIST EN ISO, 2016] in ožjim referenčnim območjem, ki se po SIST EN ISO 717 [SIST EN ISO, 2020], uporablja za določitev enoštevskih kazalnikov.

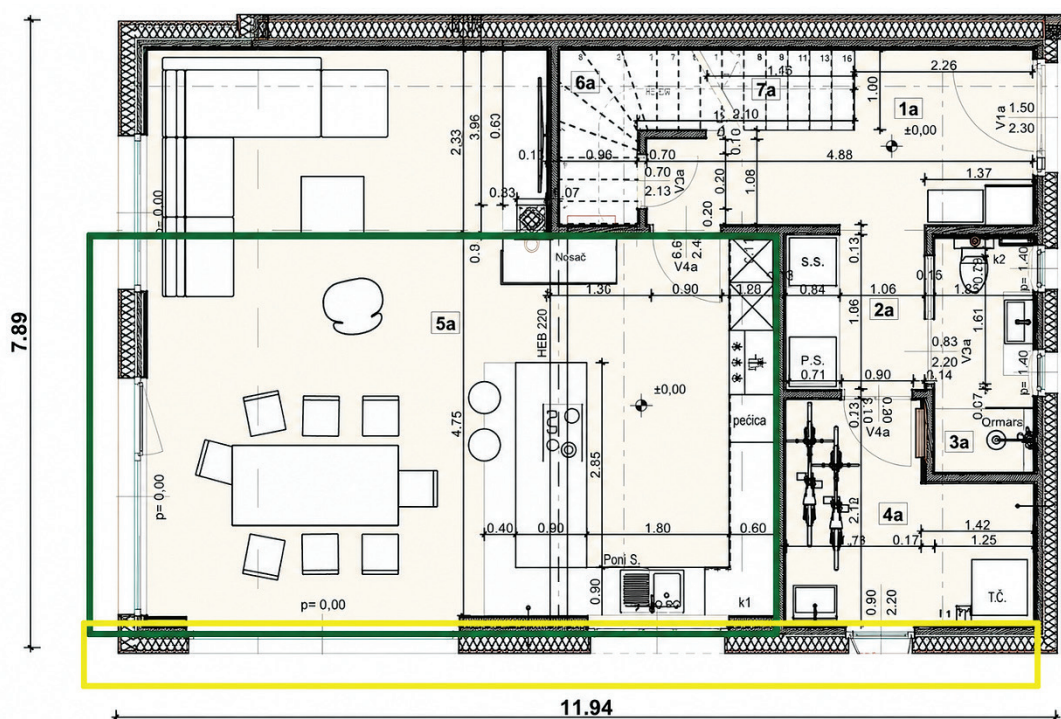
Zvočnik smo postavili na dveh lokacijah na tla pred fasado, na razdalji 5 m od objekta, da smo dosegli v standardu navedeni

vpadni kot zvoka $45^\circ \pm 5^\circ$. V sprejemnem prostoru smo uporabili fiksni mikrofoni na stojalu; izvedenih je bilo osem meritev ravni zvočnega tlaka za dva položaja zvočnika. Izmerili smo tudi hrup ozadja na petih točkah in odmevni čas na osmih točkah v sprejemnem prostoru. Razdalja med mikrofonskimi točkami je bila vsaj 0,7 m, vse točke pa vsaj 0,5 m oddaljene od sten. Pri meritvah odmevnega časa je morala biti razdalja mikrofona od zvočnika najmanj 1,0 m. Zunaj objekta smo zvočni tlak merili z mikrofonom, nameščenim 2 m pred fasado, na štiri različnih položajih, enako razdaljo pa smo ohranili tudi pri meritvah v notranjem prostoru. Tako smo zagotovili ustrezne pogoje za izračun razlikovnih ravni $D_{1s,2m}$, $D_{1s,2m,n}$ in $D_{1s,2m,n,T}$, ki jih je program samodejno izračunal.

2.4 Primerjava z nacionalnimi zahtevami in priporočili ter predlogi izboljšav

Minimalna zahtevana vrednost zvočne izolirnosti zunanje ločilne konstrukcije oziroma fasadnega ovoja, prilagojena območju hrupa, v katerem je objekt (60 dB(A)) ([UR RS, 2012]; [TSC, 2012]), znaša $R'_{w,f} + C_{tr,f} = 25 \text{ dB}$. Če podatki o dejanski oziroma računsko ocenjeni obremenitvi s hrupom niso na voljo, [TSC, 2012] za določitev potrebne zvočne zaščite zunanjega ovoja podaja zunanje ravni glede na območje varstva pred hrupom; za IV. območje znaša ta raven 75 dB(A) .

Minimalna zahtevana vrednost zvočne izolirnosti za skupno steno med enotama različnih lastnikov je 55 dB . Minimalna vrednost standardne razlike zvočnih ravni za ločilne konstrukcije v stavbah različnih namembnosti je 52 dB , dovoljena maksimalna vrednost za medetažno konstrukcijo v vrstnih hišah pa je $L'_{n,w} = 55 \text{ dB}$.



Slika 3. Tloris pritličja stanovanjske enote A z oznakami merjene fasade (rumena) oddajnega in sprejemnega (zelena) prostora, uporabljenih v meritvah

2.5 Ocena učinkovitosti zvočne zaščite pri nizkofrekvenčnih virih hrupa

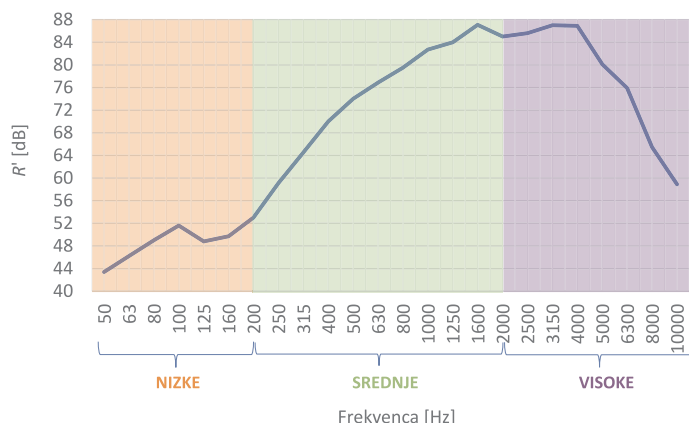
Za oceno učinkovitosti zvočne zaščite ločilnih elementov pri izpostavljenosti nizkofrekvenčnim virom hrupa je bil analiziran zvočni odtis delovanja tipične toplotne črpalke. Ta je bil uporabljen kot reprezentativni primer možne obremenitve stavbe z nizkofrekvenčnim hrupom toplotne črpalke, ki se lahko pojavi v neposredni bližini stanovanjskih stavb. Analiza je omogočila kvalitativno presojo vpliva takšnih virov na IEQ ter obravnavo učinkovitosti obravnavanih konstrukcijskih rešitev v nizkofrekvenčnem območju.

3 REZULTATI

3.1 Zvočna izolirnost predelne stene med enotama

Izmerjena vrednost gradbene zvočne izolirnosti skupne predelne stene med enotama znaša $R'_w = 71$ dB. Ta vrednost bistveno presega minimalno zakonsko zahtevano vrednost 55 dB, zato obravnavana konstrukcija zagotavlja izjemno visoko raven zvočne zaščite med prostori. Tako visoka izolirnost je pri lesenih konstrukcijah redka in potrjuje zelo kakovostno akustično zasnovo ter izvedbo [Rasmussen, 2025]. Doseženi rezultat je posledica doslednega upoštevanja akustičnih smernic pri sestavi predelne stene ter natančne izvedbe vseh konstrukcijskih in izvedbenih detajlov. Posebej pomembno je, da v konstrukciji ni akustičnih mostov, ki vedno povzročijo prenos zvoka in zmanjšajo skupno zvočno izolirnost.

Slika 4 prikazuje frekvenčni potek gradbene zvočne izolirnosti notranjega ločilnega elementa. Pri nizkih frekvencah, v območju od 50 do 160 Hz, je zvočna izolirnost med 44 in 52 dB, kar je že dobra raven zaščite glede na zahtevnost dušenja nizkofrekvenčnega zvoka. Od približno 200 Hz dalje zvočna izolirnost postopno narašča in v frekvenčnem območju med 800 in 2000 Hz doseže najvišje vrednosti, približno 87 dB. V območju srednjih in višjih frekvenc (2000–5000 Hz) ostaja izolirnost izjemno visoka, nad 80 dB, kar nakazuje zelo dobro zvočno zaščito konstrukcije.



Slika 4. Frekvenčni potek gradbene zvočne izolirnosti skupne stene enot

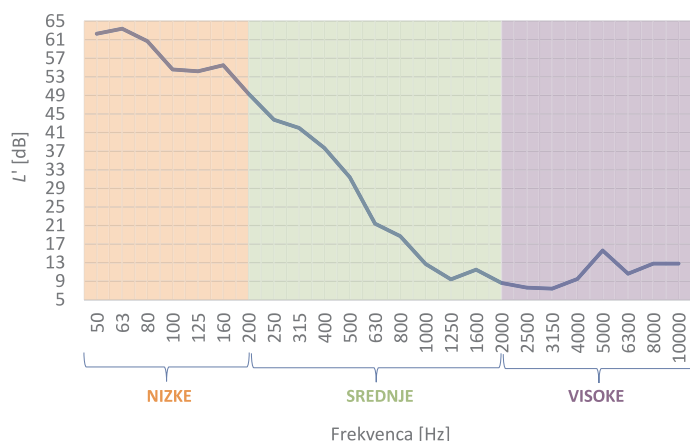
Pri frekvencah nad 5000 Hz je opazen rahel upad zvočne izolirnosti. Ker to frekvenčno območje presega standardizirano območje meritev za določanje gradbene zvočne izolirnosti, je treba rezultate interpretirati previdno. Opaženi padec zato verjetno odraža povečano merilno negotovost oziroma omejitve merilnega postopka pri zelo visokih frekvencah in ne nujno dejanskega poslabšanja akustičnih lastnosti konstrukcije. Poleg tega se frekvenčni pas nad 5000 Hz ne upošteva pri izračunu enoštevilskega kazalnika zvočne izolirnosti, zato opaženi trend ne vpliva na določeno vrednost R'_w .

Omeniti velja tudi, da vrednosti zvočne izolirnosti nad 70 dB predstavljajo zelo visoko raven zaščite, katere eksperimentalno določanje je zahtevno, saj je za ustrezno razmerje med signalom in šumom treba zagotoviti zelo visoke ravni vzburjanja v oddajnem prostoru. Posledično so lahko v tem območju merilne negotovosti večje kot pri nižjih vrednostih zvočne izolirnosti.

3.2 Normirane razlike zvočnega tlaka udarnega zvoka

Izmerjena vrednost normirane razlike zvočnega tlaka udarnega zvoka znaša $L'_{n,w} = 44$ dB in je skladna z veljavnimi zahtevami ($L'_{n,w} \leq 55$ dB). Najvišje ravni se pojavljajo v nizkofrekvenčnem območju 50–80 Hz, kjer raven udarnega zvoka dosega približno 63 dB. Kljub izpolnjevanju zahteve glede enoštevilskega kazalnika $L'_{n,w}$ ostaja frekvenčna analiza pomembna, saj razkrije izrazite nizkofrekvenčne komponente udarnega zvoka, ki jih enoštevilsko vrednotenje ne prikaže v celoti. Pri interpretaciji rezultatov v območju najnižjih frekvenc je potrebna določena previdnost, saj lahko na razpršenost rezultatov vplivajo modalni odziv sprejemnega prostora, prostorska nehomogenost zvočnega polja ter položaj vira in mikrofona. Povečana merilna negotovost lahko vpliva na natančno vrednost posameznega frekvenčnega pasu, vendar opaženega izrazitejšega nizkofrekvenčnega prenosa ni utemeljeno pripisati zgolj merilni negotovosti.

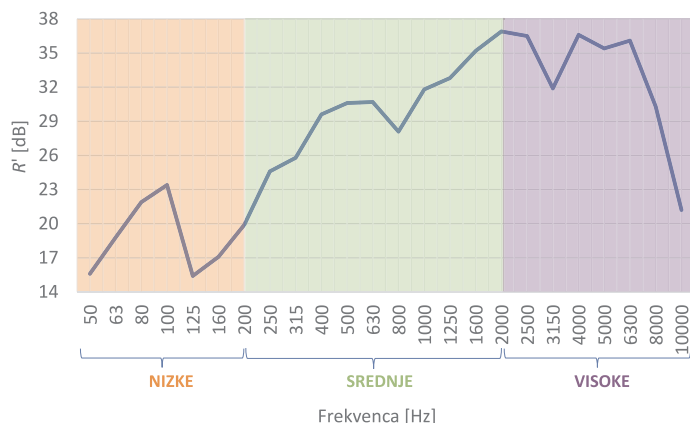
Frekvenčni potek normirane ravni udarnega zvoka je prikazan na sliki 5. Z naraščajočo frekvenco vrednosti postopoma upadajo, pri čemer se od približno 500 Hz dalje pojavi izrazitejša zmanjšanje ravni. V območju srednjih in višjih frekvenc (nad 1250 Hz) ravni ostajajo pod 15 dB. Pri najvišjih frekvencah so opazna manjša nihanja rezultatov, ki so verjetno posledica povečane merilne negotovosti zaradi zelo nizkih izmerjenih ravni in možnega vpliva hrupa ozadja. Ker se to frekvenčno območje ne upošteva pri določanju enoštevilskega kazalnika $L'_{n,w}$, opažena nihanja nimajo vpliva na oceno akustične učinkovitosti konstrukcije. Takšen potek je značilen za udarni zvok, saj nizkofrekvenčno območje praviloma predstavlja največji izziv pri zvočni zaščiti medetažnih konstrukcij. Rezultati kažejo, da konstrukcija učinkovito omejuje prenos srednjih in visokih frekvenc udarnega zvoka, medtem ko so nizkofrekvenčne komponente, pričakovano, bolj izrazite. Izrazitejši nizkofrekvenčni odziv je skladen z značilnim dinamičnim obnašanjem lahkih lesenih konstrukcij. Ker posamezni dinamični parametri obravnavane konstrukcije niso bili določeni ločeno, opaženega pojava ni mogoče pripisati samo enemu mehanizmu, temveč je lahko posledica skupnega vpliva površinske mase, togosti, resonančnih pojavov, konstrukcijskih stikov in strukturnega dušenja.



Slika 5. Frekvenčni potek normirane razlike zvočnega tlaka udarnega zvoka

3.3 Zvočna izolirnost zunanje stene z oknom

Zvočna izolirnost zunanje ločilne konstrukcije je $R'_w = 32$ dB in ustreza zakonsko zahtevani mejni vrednosti (min. 25 dB). Slika 6 prikazuje graf frekvenčnega poteka zvočne izolirnosti fasade. Pri nizkih frekvencah (50–100 Hz) je izolirnost nizka (okoli 15–20 dB), kar pomeni, da fasada z oknom oziroma zasteklitvijo manj učinkovito duši nizkofrekvenčne zvoke, na primer prometni hrup. V srednjem frekvenčnem območju (250–2000 Hz) izolirnost narašča in doseže okoli 35–38 dB, kar kaže na dobro učinkovitost pri dušenju srednjih frekvenc (govor, večina hrupa iz okolja). Pri visokih frekvencah (nad 4 kHz) je opazen manjši upad izmerjenih vrednosti. Ker so v tem frekvenčnem območju vplivi merilne negotovosti lahko izrazitejši, opaženi trend ne pomeni nujno dejanskega poslabšanja akustične učinkovitosti konstrukcije. Kljub temu zvočna izolirnost ostaja razmeroma visoka. V nizkofrekvenčnem območju, zlasti v pasu 125 Hz, je bila izmerjena nižja zvočna izolirnost (približno 16 dB). Možni razlogi za takšen frekvenčni potek so lahko povezani z resonančnimi lastnostmi zasteklitve oziroma okenskega sklopa, značilnostmi njegove vgradnje ali drugimi lokalnimi vplivi fasadnega ovoja. Ker posamezni vplivni dejavniki v okviru raziskave niso bili ločeno analizirani, dejanskega vzroka na podlagi izvedenih meritev ni mogoče zanesljivo določiti.



Slika 6. Frekvenčni potek zvočne izolirnosti fasade

3.4 Problematika virov nizkofrekvenčnega hrupa v bivalnem okolju

V bivalnem okolju se pojavljajo zvočni viri v zelo širokem frekvenčnem območju, zato mora biti zvočna zaščita notranjih in zunanjih ločilnih elementov prilagojena tako nizkofrekvenčnim (NF) kot visokofrekvenčnim (VF) obremenitvam ([Cavanaugh et al., 2009]). Med pogoste notranje vire sodijo gospodinski aparati, kot so hladilnik (50–200 Hz; 40–55 dB(A)), pomivalni stroj (50–3000 Hz; 44–60 dB(A)), sušilnik za lase (400–4000 Hz; 70–90 dB(A)), televizor (300–3400 Hz; 60–70 dB(A)) ter otroški jok (400–600 Hz; 75–90 dB(A)) ([Jeon et al., 2007]; [Che et al., 2024]). Zunanji viri, pomembni za oceno učinkovitosti fasadnega ovoja, vključujejo toplotne črpalke (50–500 Hz; 58–62 dB(A)), kosilnice (100–300 Hz; 85–90 dB(A)), cestni promet (700–1300 Hz; ~72 dB(A)), piskanje zavor (1000–16000 Hz; 100–110 dB(A)) ter lajanje psa (200–2000 Hz; ~80 dB(A)) ([Papinniemi et al., 2002]; [Atamer et al., 2019]). Navedene ravni hrupa so orientacijske, saj so izmerjene vrednosti odvisne od merilnih pogojev, zlasti od zvočne moči in usmerjenosti vira, oddaljenosti od vira ter akustičnih značilnosti okolja, zato jih ni mogoče neposredno obravnavati kot značilne emisijske ali imisijske vrednosti posameznega vira.

Pri stavbah z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenega lesa (CLT) se vpliv nizkofrekvenčnih virov lahko izkaže kot kritičen, saj zaradi relativno majhne mase konstrukcije dolgovalovni zvok lažje prodira skozi zunanje in notranje ločilne elemente [Cavanaugh et al., 2009]. To se lahko odrazi v zmanjšani zvočni izolirnosti v območju okoli 100 Hz, kjer so izmerjene vrednosti lahko tudi približno 8 dB pod referenčno krivuljo, kar potrjuje občutljivost takšnih fasad na NF obremenitve. V običajnih stanovanjskih razmerah to praviloma ni odločilna omejitev, lahko pa predstavlja težavo v bližini prometnih ali tehničnih virov z izrazitim nizkofrekvenčnim spektrom.

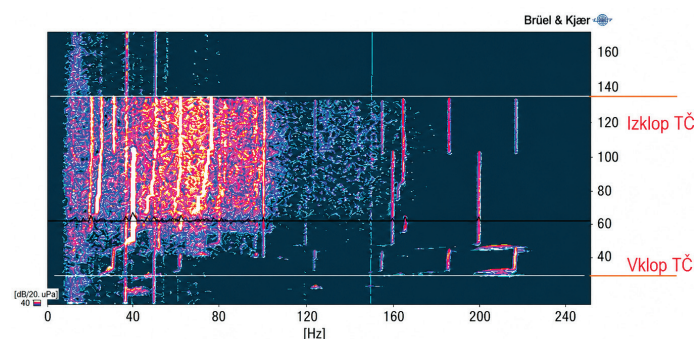
V visokofrekvenčnem območju (nad 4000 Hz) konstrukcije iz CLT praviloma dosegaajo zelo dobre rezultate, vendar je njihova učinkovitost močno odvisna od kakovosti izvedbe detajlov. Netesnosti pri stikih panelov, okenskih odprtinah in inštalacijskih prebojih lahko povzročijo lokalne preboje zvočne zaščite, zaradi česar se izolativnost v tem območju kljub dobrim globalnim kazalnikom lahko bistveno poslabša [Jeon et al., 2007].

Pri notranjih ločilnih elementih so posebej problematični nizkofrekvenčni in udarni viri, kot so pralni stroji v fazi centrifuge ter hoja, tek ali skoki, kjer se energija prenaša v obliki vibracij prek konstrukcije in stranskih prenosov. Podobno se obnašajo glasbeni viri z izrazitim nizkofrekvenčnim delom, na primer nizkotonci (»subwooferji«) (20–120 Hz), pri katerih se vibracije širijo prek togih stikov in povezav [Papinniemi et al., 2002]. Zato so pri CLT-stavbah ključni plavajoči estrihi, elastični vmesniki ter večslojni sistemi z dosledno zatesnjenimi stiki.

Sklepno lahko povzamemo, da CLT-konstrukcije zagotavljajo zelo dobro zvočno zaščito v srednjem frekvenčnem območju, medtem ko nizkofrekvenčni zunanji in notranji viri ter visoke frekvence ob netesnih detajlih zahtevajo dodatne konstrukcijske in izvedbene ukrepe za zagotavljanje zadovoljivega akustičnega udobja ([Cavanaugh et al., 2009]).

3.5 Zvočni odtis delovanja tipične toplotne črpalke

Slika 7 prikazuje časovno-frekvenčni spektrogram hrupa toplotne črpalke, izmerjen s kontrolnim mikrofonom, nameščenim v neposredni bližini naprave. Meritev je bila izvedena v nočnem času, ko drugi viri hrupa niso bili prisotni. Na vodoravni osi so prikazane frekvence (Hz), na navpični osi čas, barvna lestvica pa predstavlja ravni zvočnega tlaka posameznih frekvenčnih komponent. Spektrogram omogoča sočasen vpogled v frekvenčno sestavo hrupa in njegovo časovno spreminjanje znotraj enega cikla delovanja toplotne črpalke.

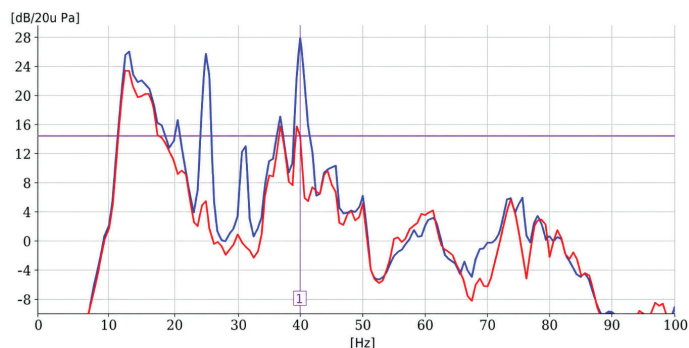


Slika 7. Spektrogram hrupa v zunanjem okolju. Rdeča horizontalna črta prikazuje izklop in vklop TČ (vodoravna os: frekvenca [Hz]; navpična os: raven zvočnega tlaka [dB])

Iz prikaza je razvidna značilna dinamika ob vklopu in delovanju toplotne črpalke. Ob vklopu naprave se pojavijo izrazite frekvenčne komponente, ki časovno sovpadajo z začetkom delovanja posameznih sestavnih delov, kot so kompresor, obtočna črpalčka in ventilator. Najizrazitejši energijski prispevek je zaznan v nizkofrekvenčnem območju med 20 in 100 Hz, z jasno izraženimi frekvenčnimi vrhovi, zlasti pri približno 40 Hz in 20 Hz. Najvišja izmerjena raven hrupa znaša $L_{\max} = 49,5$ dB pri frekvenci 40 Hz. Spremembe v amplitudi in položaju teh frekvenčnih komponent kažejo na časovno odvisno spreminjanje obratovalnega režima, na primer na spremembe vrtljajev kompresorja ali ventilatorja. Spektrogram tako nedvoumno potrjuje vzročno povezavo med delovanjem toplotne črpalke in pojavom nizkofrekvenčnega hrupa v prostoru.

Slika 8 prikazuje G-utežen frekvenčni spekter nizkofrekvenčnega hrupa, izmerjen v varovanem prostoru. Na vodoravni osi je prikazana frekvenca (Hz), na navpični osi pa raven zvočnega tlaka v dB re 20 μ Pa. Prikazana sta dva merilna scenarija: stanje delovanja toplotne črpalke (modra krivulja) in stanje mirovanja naprave (rdeča krivulja), kar omogoča neposredno primerjavo vpliva delovanja naprave na nizkofrekvenčni hrup v prostoru.

Iz grafa je razvidno izrazito povečanje ravni hrupa v času delovanja naprave, zlasti v ključnem nizkofrekvenčnem območju med 20 in 50 Hz, ki ga G-uteženje posebej poudari zaradi pomembnosti za človekovo zaznavanje. Jasno je opazen porast pri približno 25 Hz, največja razlika med obema stanjema pa se pojavi pri okoli 40 Hz, kjer je zaznano povečanje ravni hrupa v velikosti približno 5–10 dB. Takšna razlika je za človeka jasno zaznavna in psihofizično moteča, zato predstavlja pomemben dejavnik akustičnega neugodja, zlasti v nočnem času ob odsotnosti maskirnih virov.



Slika 8. G-utežen frekvenčni spekter nizkofrekvenčnega hrupa v varovanem prostoru (modra krivulja: TČ deluje, rdeča: TČ miruje) (vodoravna os: frekvenca [Hz]; navpična os: raven zvočnega tlaka [dB])

Prisotne so tudi večkratne frekvenčne konice, kar kaže na mehanski sistemski vir hrupa z več harmoničnimi komponentami, skladnimi z delovanjem rotacijskih delov naprave. Oblika spektra dodatno nakazuje vpliv akustičnih lastnosti prostora; zaradi pravokotne geometrije prostora in klasične masivne gradnje se pojavljajo stoječi valovi, ki povzročajo lokalna ojačanja nizkofrekvenčnega zvočnega tlaka ter povečujejo zaznavnost hrupa v prostoru.

Analiza z uporabo G-uteženega filtra tako jasno potrjuje, da je delovanje toplotne črpalke neposredno povezano z izrazitim povečanjem nizkofrekvenčnega hrupa v prostoru, kar je ključno z vidika ocene bivalnega neugodja.

4 SKLEP

Akustično načrtovanje stavb z nosilno konstrukcijo iz CLT zahteva celovit pristop, saj je njihovo akustično obnašanje izrazito frekvenčno odvisno. Zlasti v nizkofrekvenčnem območju na zvočno izolirnost vpliva kombinacija površinske mase, togosti, resonančnih pojavov, konstrukcijskih stikov in strukturnega dušenja. Doseganje ustreznega akustičnega udobja je zato odvisno od premišljene kombinacije arhitekturnih, konstrukcijskih in izvedbenih ukrepov ter zgodnje integracije akustičnih zahtev v proces projektiranja. Ključna izhodišča vključujejo analizo lokacijskih razmer in pričakovanih hrupnih obremenitev, ustrezno funkcionalno razporeditev prostorov, enakovredno obravnavo zunanjih in notranjih ločilnih elementov z vidika gradbene fizike in akustike ter skrbno načrtovanje konstrukcijskih detajlov, vključno z odprtini in stiki. Posebno pozornost je treba nameniti tudi izbiri in vgradnji tehničnih sistemov stavbe, saj lahko neustrezna namestitve predstavljajo pomemben vir zvočnih in vibracijskih obremenitev.

Rezultati študije primera so pokazali, da lahko ustrezno načrtovane CLT-ločilne konstrukcije dosegajo zelo visoko raven zvočne zaščite. Izmerjena vrednost zvočne izolirnosti med bivalnimi enotami $R'_{w} = 71$ dB pomeni izredno visoko raven zaščite pred zračnim hrupom in pomembno presega minimalne zahteve predpisov. Ugotovitev potrjuje, da CLT-tehnologija sama po sebi ne predstavlja omejitve za doseganje visokega akustičnega udobja, če so konstrukcijski sklopi in detajli projektirani celovito ter skladno z akustičnimi načeli.

Hkrati rezultati kažejo na povečano občutljivost fasadnega ovoja za nizkofrekvenčne zunanje vire hrupa. Izmerjeni frekvenčni potek zvočne izolirnosti fasade je pokazal zmanjšano učinkovitost v nizkofrekvenčnem pasu, zlasti okoli 40 Hz, kjer izolirnost dosega približno 15–20 dB. Možni razlogi so lahko povezani z lastnostmi okenskega sklopa, njegovo vgradnjo in lokalnimi resonančnimi pojavi, vendar posamezni vplivi v okviru raziskave niso bili ločeno analizirani.

Na tej podlagi je mogoče sklepati, da bi se v primeru vira z izrazitim nizkofrekvenčnim spektrom v neposredni bližini obravnavane stavbe (npr. toplotna črpalka) lahko pojavila povečana zaznavnost nizkofrekvenčnega hrupa v notranjih prostorih, subjektivno zaznavno predvsem v nočnem času. To poudarja pomen celovite obravnave nizkofrekvenčnega hrupa že v fazi načrtovanja ter potrebo po dodatnih preventivnih ukrepih pri umeščanju in vgradnji tehničnih naprav v okolici stanovanjskih stavb iz CLT skladno z LEDSTA (2025).

5 ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujemo lastnikom stavbe, v kateri so bile izvedene meritve, projektantski ekipi ter sodelujočim akustikom za njihovo strokovno podporo in sodelovanje pri izvedbi raziskave. Posebna zahvala gre podjetjem, ki so prispevala strokovno znanje (družbi DECIBEL akustični inženiring) in omogočila uporabo merilne opreme (IMS Merilni sistemi in Zavod za varstvo pri delu (ZVD)).

Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa P2 0158 (Gradbene konstrukcije in gradbena fizika).

6 LITERATURA

Andargie, M., Touchie, M., O'Brien, W., Müller-Trapet, M., A field study of the relationship between sound insulation and noise annoyance, activity disturbance and wellbeing in multi-unit residences, *Applied Acoustics*, 206, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109291>.

Atamer, S., Altinsoy, M.E., Hirschfeld, J., Vibro-Acoustical Analyses of a Dishwasher, *DAGA 2019 – Fortschritte der Akustik*, 2019, https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2019/data/articles/000117.pdf

Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., et al., Auditory and non-auditory effects of noise on health, *The Lancet*, 383, 1325–1332, 2014, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X).

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A., Cross laminated timber (CLT): overview and development, *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 3, 331–351, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.

Cavanaugh, W.J., Tocci, G.C., Wilkes, J.A., *Architectural Acoustics: Principles and Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2009.

Che, L., Lee, H.M., Lee, H.P., Acoustical analysis and optimization design of the hair dryers, *Noise Mapping*, 11(1), 20240004, 2024, <https://doi.org/10.1515/noise-2024-0004>.

Chen, K., Kang, J., H., Evaluation of healthy indoor acoustic environments in residential buildings by the occupants: A mixed-method approach, *Building and Environment*, 246, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110950>.

Dovjak, M., Kuček, A., Creating healthy and sustainable buildings: an assessment of health risk factors, *Springer Open*, Cham, 2019, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-19412-3>.

Gösele, K., Schröder, E., Sound Insulation in Buildings, in *Handbook of Engineering Acoustics*, Springer, 2012, https://doi.org/10.1007/978-3-540-69460-1_7 (14 junij 2026).

International WELL Building Institute (IWBI). WELL Building Standard, WELL v2. International WELL Building Institute, New York, 2024, <https://www.wellcertified.com/> (14 junij 2026).

Jeon, J.Y., You, J., Chang, H.Y., Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments, *Applied Acoustics*, 68(10), 1118–1134, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.06.005>.

Karacabeyli, E., Douglas, B. (Eds.), *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*, FPinnovations, Binational Softwood Lumber Council, 2013.

Klinc, L., Vloga zvočne zaščite lesenih stavb v procesu graditve: študija primera, magistrsko delo, Ljubljana, 2025, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=175329> (14 junij 2026).

Kim, J., Park, H.-G., Han, H.-K., Mun, D.-H., Effect of reinforced concrete structure type on low frequency heavy impact sound in residential buildings, *Applied Acoustics*, 155, 139–149, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.05.005>.

LEDSTA, Laboratorij za energetske delovne stroje in tehnično akustiko, Čurovič, L., Strokovne podlage za spremembo zakonodaje s področja hrupa toplotnih črpalk, Republika Slovenija, Ministrstvo za Okolje, Podnebje in Energijo, 2025, <https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOPE/Okolje/Hrup/Strokovne-podlage-hrup-toplotnih-crpank.pdf> (14 junij 2026).

Mewomo, M., Toyin, J., Iyiola, C., Aluko, O., Synthesis of critical factors influencing indoor environmental quality and their impacts on building occupants health and productivity, *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21, 2, 619–634, 2023, <https://doi.org/10.1108/jedt-10-2021-0595>.

Papinniemi, J., Lai, J.C.S., Zhao, J., Loader, L., Brake squeal: a literature review, *Applied Acoustics*, 63(4), 391–400, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00043-3).

Rasmussen, B., Sound insulation requirements in multi-storey housing – A health issue or just comfort?, *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, 2025, 82X04001227.

Sato, H., Hirota, T., Hiramitsu, A., and Tanaka, M., Subjective evaluation of floor impact sound of wood-frame construction dwellings in different living situation, *Proceedings of INTER-NOISE 2014 – 43rd International Congress on Noise Control Engineering*, Melbourne, Australia, 2014, Paper 747.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 16283-1:2014. Acoustics – Field measurements of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2014.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 16283-2:2020. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2020.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 16283-3:2016. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Façade sound insulation. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2016.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 717-1:2020. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2020.

Skinner, C.J., Grimwood, C.J., The UK noise climate 1990–2001: population exposure and attitudes to environmental noise, *Applied Acoustics*, 66(2), 231–243, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.07.009>.

Slovensko društvo za akustiko (SDA). Strokovni posvet o hrupu obratovalne opreme in možnih vplivih na okolje. Slovensko društvo za akustiko, 2022. <https://www.drustvo-akustika.si/> (14 junij 2026).

Späh, M., Hagberg, K., Bartlomé, O., Weber, L., Leistner, P., Liebl, A., Subjective and Objective Evaluation of Impact Noise Sources in Wooden Buildings, *Building Acoustics*, 20(3), 193–213, 2013, <https://doi.org/10.1260/1351-010X.20.3.193>.

Torresin, S., Albatici, R., Aletta, F., Babich, F., Oberman, T., Siboni, S., Kang, J., Indoor soundscape assessment: A principal components model of acoustic perception in residential buildings, *Building and Environment*, 182, 107152, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107152>.

TSG, Tehnična smernica TSG 1 005:2012 – Zaščita pred hrupom v stavbah. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor (MOP), 2012.

UR RS, Pravilnik o zaščiti pred hrupom v stavbah. Ur. L. RS, št. 10/12 s spr., 2012.

Vrhovnik, M.M., Prislán, R., Recent Developments in Investigating and Understanding Impact Sound Annoyance—A Literature Review, *Acoustics*, 7(2), 2025, <https://doi.org/10.3390/acoustics7020021>.

WHO, World Health Organization. Environmental noise guidelines for the European Region, 2024.

WHO, Guidance on environmental noise. World Health Organization, 2024. <https://www.who.int/tools/compendium-on-health-and-environment/environmental-noise/> (14 junij 2026).

Zou, Y., Liu, M., H., Characterization and Effects of Floor Impact Sound in Residential Buildings: A Systematic Review, *Acoustics*, 7(1), 2025, <https://doi.org/10.3390/acoustics7010010>.