

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

PROTIHRUPNA ZAŠČITA

Seminar pri Izbranih poglavjih iz uporabne fizike

Klemen Križaj
Mentor: doc. dr. Primož Ziherl
Gorje, 29. 5. 2009

Povzetek

Protihrupna zaščita postaja zaradi večje uporabe strojev in urbanizacije vedno bolj pomembna v našem življenju. V tem seminarju predstavimo fiziko protihrupne zaščite, nekatere tehnike, ki se uporabljajo v akustiki, ter pristope k zmanjševanju hrupa ob prometnicah in stanovanjskih naseljih.

Uvod

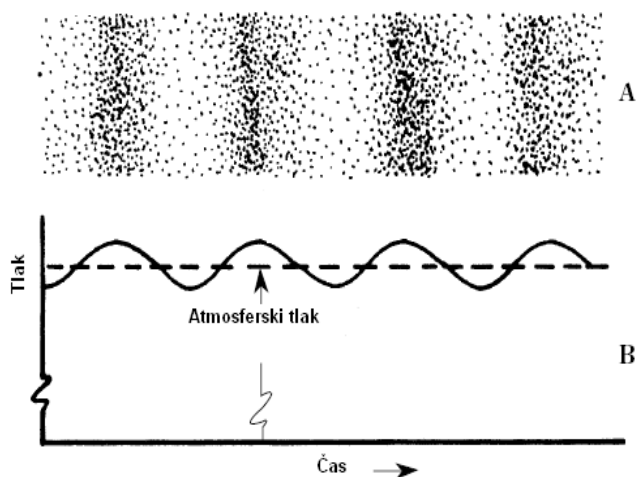
Zvok lahko definiramo kot valovanje zraka (ali drugega elastičnega medija) ali kot vzbujanje slušnega mehanizma. Izbrana definicija je odvisna od tega, ali gledamo skozi oči fizike ali skozi psihofizične oči bitja. Izbira definicije nam določi pot, po kateri se bomo lotili spoznavanja zvoka. V tem seminarju bomo morali upoštevati obe definiciji, saj je hrup po naravi definiran preko človeškega ušesa, toda če hočemo razumeti izbiro protihrupnih zaščit, bomo morali gledati na zvok kot na fizikalni proces.

V 20. stoletju se je zaradi vedno večje razširjenosti tehnoloških proizvodov (posebno pomemben je bil razvoj bencinskih motorjev ter s tem povečanje prometa) raven hrupa v človeški okolici povečevala. Človek je biološko zasnovan za življenje v mirnem, tistem okolju in dve stoletji, kar traja industrializacija, je premalo, da bi se človek privadil na višje ravni glasnosti, ki jih moderni način življenja prinaša s seboj. Zato smo razvili tehnike za zmanjševanja ravni zvoka oz. hrupa v vseh sferah našega življenja, najsi bo to doma, v službi ali na cesti. Hrup definirajmo kot vsak zvok, ki nam je neprijeten oz. je nezaželen.

Posebno pozornost zmanjševanju hrupa se zadnje čase namenja pri urbanističnem načrtovanju ulic. Klasična postavitve ulic je akustično neprimerna, saj se hrup iz cestnega predela širi v notranjost sosesk, kar nekje kompenzirajo s postavitvijo protihrupnih steklenih sten [1]. Pri nas še nismo začeli z aktivno politiko zmanjševanja hrupa v mestih. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) skrbi za meritve hrupa v Sloveniji, ki pripomorejo pri načrtovanju urbanističnega razvoja mest. Po slovenski zakonodaji je mejna vrednost hrupa za območja varstva pred hrupom (bivalna območja in območja javnih storitev) 75 dBA [2].

Zvok in njega zaznavanje

Zvok je mehanično valovanje, ki se giblje skozi medij (trdnina, kapljevina ali plin). V kapljevinah in plinih je zvok vedno longitudinalno (vzdolžno) valovanje (slika 1), v trdninah je pa možno tudi transversalno (prečno) valovanje. Zvok opišemo z dvema količinama, frekvenco (ν) in



Slika 1: Sinusno zvočno valovanje. Slika A prikazuje zgoščine in razredčine, ki nastanejo zaradi zvočnega valovanja v tekočini. Točka B prikazuje spremembo tlaka pri longitudinalnem valovanju [3].

amplitudo tlaka. Prva nam poda višino zvoka (ton), medtem ko slednja poda glasnost. Valovno dolžino (λ) valovanja lahko izrazimo z frekvenco in hitrostjo zvoka v mediju (c) preko enačbe (1)

$$v = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

Zvok lahko obravnavamo z valovno akustiko ali geometrijsko akustiko, odvisno od valovne dolžine. Če je dimenzija ovire, na katero naleti zvočno valovanje, primerljiva ali manjša od valovne dolžine zvoka, moramo zvok obravnavati z valovno akustiko, v primeru, da je dimenzija ovire dosti večja (desetkrat večja) od valovne dolžine zvoka lahko uporabimo geometrijsko akustiko. Pri geometrijski akustiki se ob prehodu zvoka preko ovire za njo tvori senca (zvočno polje praktično ni prisotno), medtem ko se pri valovni akustiki tudi v geometrijski senci pojavi zvočno polje. To si bomo bolj podrobno ogledali še v nadaljevanju seminarja.

Glasnost zvoka je definirana preko tlačne razlike pri zvočnem valovanju. Glasnost je definirana v logaritemski skali kot:

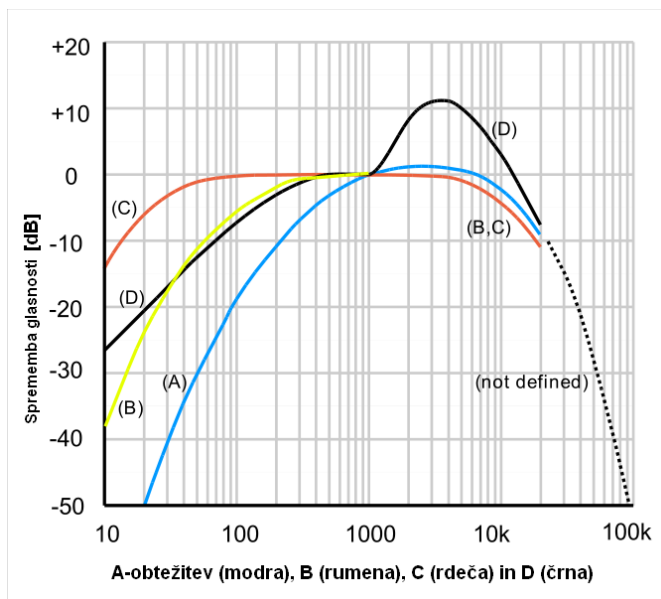
$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p_1^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_0}. \quad (2)$$

p_0 je naš referenčni tlak (2×10^{-5} Pa [4]), p_l pa merjeni tlak. Glasnost se lahko izrazi z močjo zvoka kot

$$L_P = 10 \log_{10} \frac{P_1^2}{P_0^2}, \quad (3)$$

kjer sta P_I merjena moč in P_0 referenčna moč (10^{-12} W [4]).

Človeško uho lahko zaznava frekvence med 20 Hz in 20 kHz. Ta razpon je v veliki meri odvisen od posameznika. Občutljivost človeškega sluha ni konstantna v tem območju; uho je najbolj občutljivo na frekvence med 1000 Hz in 3500 Hz. Definicija glasnosti, kot smo jo opisali, ne upošteva občutljivosti človeškega ušesa. Zato so prišle v uporabo obtežitve A (prvotno namenjena obtežitvi tihih zvokov), B, C (opuščena standarda pri meritvah hrupa) in D (namenjena meritvam letalskega hrupa) (slika 2) [3, 4].



Slika 2: Krivulje obteženosti v odvisnosti od frekvence zvoka. Od vseh obtežitev se pri meritvah hrupa primarno uporablja obtežitev A [4].

Te upoštevajo občutljivost ušesa na različne frekvence pri izračunu glasnosti. Pri meritvah hrupa je najbolj uporabljena utežitev A [3].

Prenos hrupa

Hrup se lahko v našo okolico prenaša na različne načine: preko zraka (zvok), strukturnega prenosa (tresljaji) in preko membranskega efekta. Prvi način je vsem znan, zato bomo njegovo nadaljnjo obravnavo preskočili.

Strukturni prenos je, ko zvočni valovi rahlo vzbudijo nihanje na površini trdnine. To nihanje se potem prenese preko trdnine na drugo stran, kjer nihanje na drugi stranici vzbudi nihanje zraka ob stranici in tako prenese valovanje zopet v zrak. Strukturni prenos se vzbudi lahko tudi neposredno ob mehanični interakciji predmetov z trdnino.

Membranski efekt je precej podoben strukturnemu prenosu. Tu zračno valovanje ne vzbudi samo posameznih elementov v strukturi (mikroskopsko), ampak celotno strukturo (makroskopsko), da valuje. Membranski efekt povzroči, da se zvok širi dalje preko zračne in strukturne poti. Ob vpetju z trdnino vzbudi mehansko valovanje (strukturni prenos) ob drugi stranici pa vzbuja zrak. Mogoče je bila ta razlaga rahlo nerazumljiva, zato je najboljša, da si ogledamo primer. Najboljši primer elementa, ki prenaša zvok preko membranskega efekta, je okno. Ko vpade zvočno valovanje na okno, to povzroči, da začne celotna steklena površina valovati z enako frekvenco, kot je frekvenca zvočnega valovanja. Če je okno enoslojno, to povzroči, da začne zrak za oknom valovati enako, kot valuje steklena površina. Tako se zunanje zvočno valovanje prenese v notranje. Toda ker je okno vpeto, se valovanje prenese tudi preko vpetja v strukturo in tako dobimo tudi strukturni prenos zvoka. Da omejimo ta prenos, so vsa okna vpeta z gumo, ki absorbira večino tega valovanja [3, 5].

Protihrupna zaščita

V osnovi so trije načini, kako lahko zmanjšamo nezaželen hrup [3, 5]:

1. Zmanjšamo energijo hrupa v bližini poslušalca (soba, bivališče, dvorana)
2. Postavimo zvočne ovire med izvor hrupa in poslušalcem (protihrupne ograje)
3. Zmanjšamo moč oddajanja hrupa pri samem izvoru

Najbolj učinkovit je zadnji način, saj je največkrat najlažje dosegljiv in z najmanjšimi posegi. Proizvajalci naprav, ki so izvori hrupa, že pri načrtovanju poskrbijo, da je jakost hrupa čim manjša. Lep primer so dušilci, ki jih proizvajalci vozil namestijo na izpušni sistem ali gumijasti blažilniki, ki so nameščeni na večjih napravah. Na žalost je v večini primerov nemogoče neposredno vplivati na izvor hrupa. Na hrup, ki ga proizvedejo vozila na avtocesti, stanovalci bližnjih zgradb nimajo neposrednega vpliva. V takih primerih uporabimo prvi in drugi način. Ta dva načina sta mnogo bolj težavna za implementacijo in posledično tudi dražja. Medtem ko pri tretjem načinu lahko z relativno drobnimi posegi močno zmanjšamo raven hrupa, pri prvem in drugem načinu potrebujemo bolj intenzivne posege, ki prinesejo rahlo zmanjšanje hrupa [3, 5].

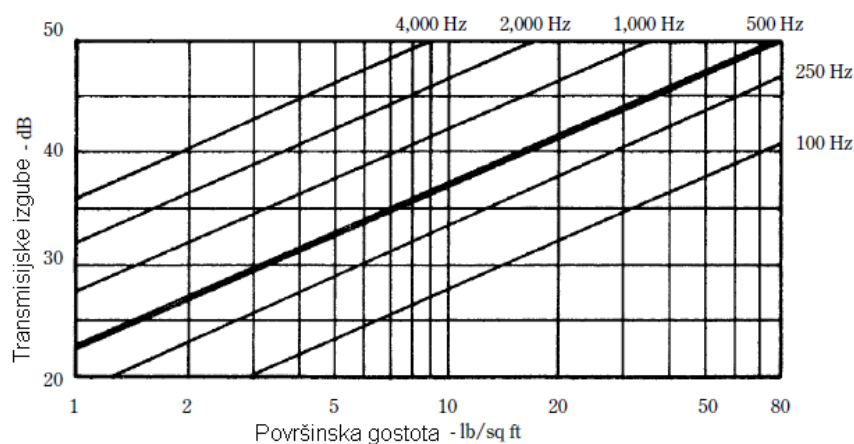
Protihrupna zaščita zgradb

Najpogostejši način za zavarovanje pred hrupom je pravilna izbira gradnje in izolacije sten. Danes že ob načrtovanju zgradbe upoštevamo nivo okoliškega hrupa in temu primerno izberemo material in način gradnje.

Količina zvoka, ki se bo zadušila v steni, je povezana s površinsko gostoto naše stene. Čim večja je ta gostota, tem manj zvoka bo prišlo skozi steno. Površinsko gostoto izračunamo z enačbo (4)

$$\rho_s = \frac{m}{S}, \quad (4)$$

kjer je m masa celotne stene in S njena površina. Kot vidimo, zvočne izgube niso odvisne od dimenzije stene, so pa odvisne od frekvence zvoka (slika 3).



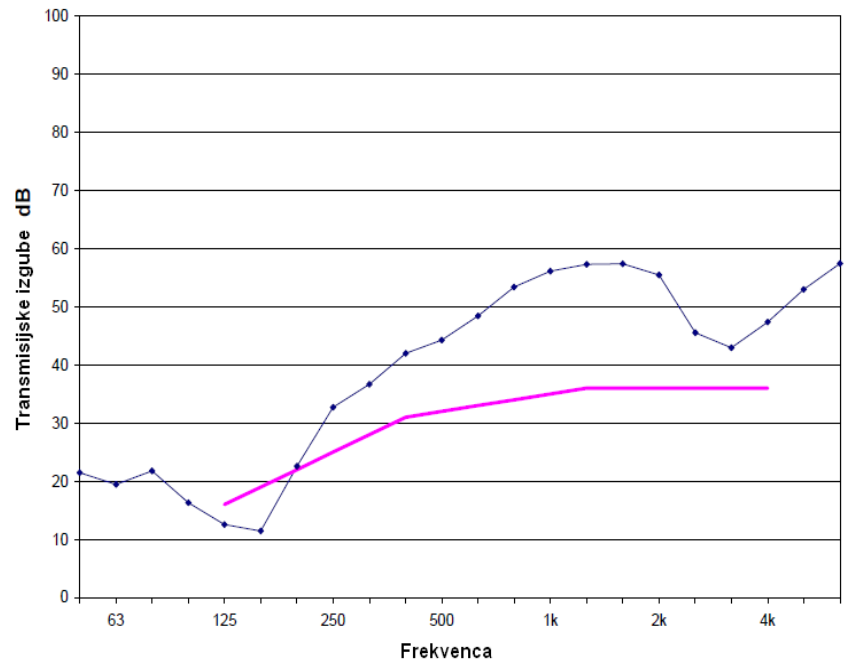
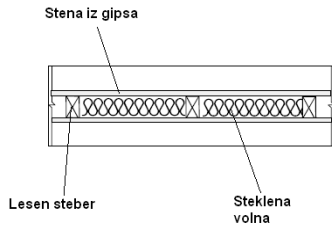
Slika 3: Transmisijske izgube v odvisnosti od površinske gostote pri različnih frekvencah zvoka. Izgube niso odvisne od vrste materialov, le od površinske gostote. Odebeljena črta predstavlja izgube pri 500 Hz (najpogostejše podana pri materialih) [3].

Porozni materiali so zelo dobri za toplotno izolacijo, a ne najboljše izbira pri zidovih. Precej boljše se izkaže pri absorpciji zračnega valovanja, a ne pri strukturnem prenosu hrupa. Če imamo v notranjosti zidu prazne prostore, je priporočljivo, da izoliramo votlino z poroznimi materiali (steklena volna). V votlini bi se namreč pri prenosu hrupa skozi steno pojavilo stoječe valovanje z frekvenco, enako lastni frekvenci votline. To bi ojačalo prenos hrupa te frekvence skozi steno, zato votlino ovijemo z poroznimi materiali, da absorbira tako nastalo valovanje.

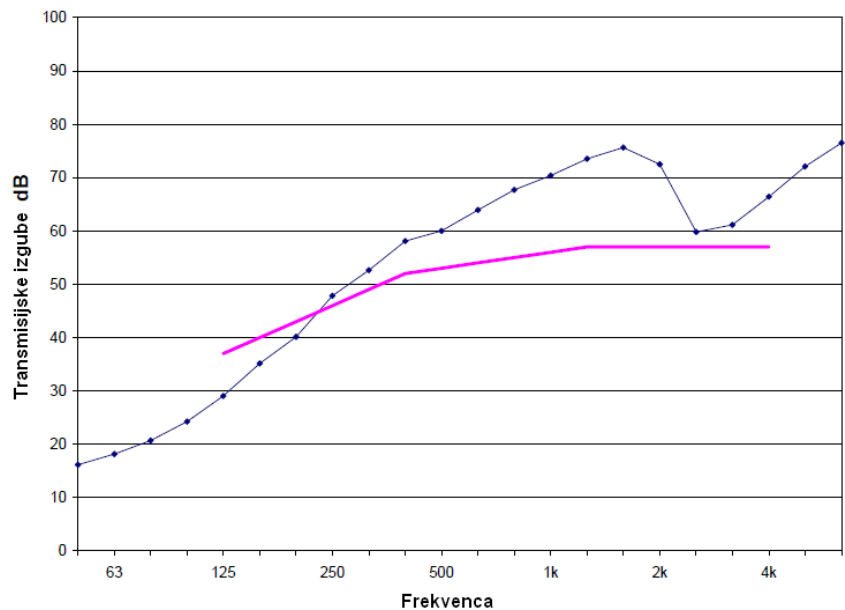
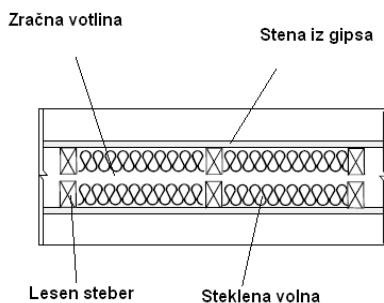
Odvisnost prenosa zvoka od površinske gostote (masni zakon) na žalost v realnosti ni tako preprosta kot prej opisano, saj ne upošteva možnost nekaterih pojavov, kot je npr. resonanca v zidovih (slika 4).

V gradbeništvu se pri kvalifikaciji zvočne prepustnosti zidov uporabljata standarda STC (ZDA) in SRI (Evropa). Oba podata približno vrednost znižanja hrupa pri prehodu skozi element v dB [3, 4].

**TL-93-176
STC 32**

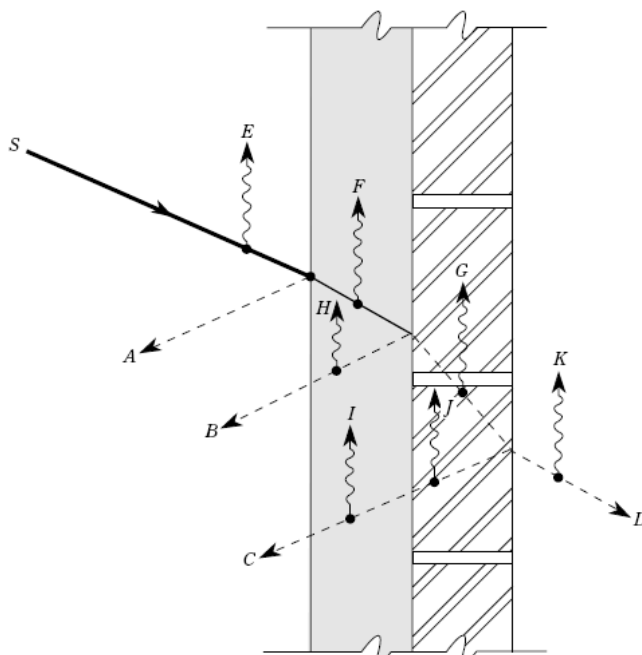


**TL-93-279
STC 53**



Slika 4: Meritve transmisijskih izgub pri različnih frekvencah. Modra črta predstavlja transmisijске izgube pri različnih frekvencah, vijolična pa referenčno krivuljo po standardu STC. V prvem primeru imamo steno iz gipsa, napolnjeno z stekleno volno. Drugi primer je stena iz gipsa z dvema plastema steklene volne in zračno votlino med njima. V obeh primerih so uporabljeni leseni stebri. Vidimo, da je druga stena precej boljša za protihrupno izolacijo. Pri 1500 Hz ima prva stena transmisijске izgube 58 dB, medtem ko ima druga 74 dB [6].

Govorili smo, koliko hrupa se zaduši ob prehodu skozi steno, sedaj si ogledjmo, kako se zvok širi skozi steno (Slika 5).



Slika 5: Prehod zvoka skozi zid od točke S do točke D. Črtkaste črte nakazujejo odboj (A, B, C), valovite pa disipacijo energije v obliki toplote (E, F, G, H, I, J, K) [3].

Zvok ob prehodu skozi zid v tem vzbudi nihanje in ker so v trdnini delci vezani, je to nihanje dušeno in se posledično energija disipira. Porozni materiali so še posebno učinkoviti pri absorpciji hrupa, saj je zaradi luknjaste strukture na površini absorpcijska površina precej večja kot pri drugih materialih.

Učinkovitost absorpcije materiala opišemo z absorpcijskim koeficientom. Ločimo dva absorpcijska koeficienta:

- energijski absorpcijski koeficient (α) in
- Sabinov absorpcijski koeficient (a).

Povezavo med njima opisuje enačba (5):

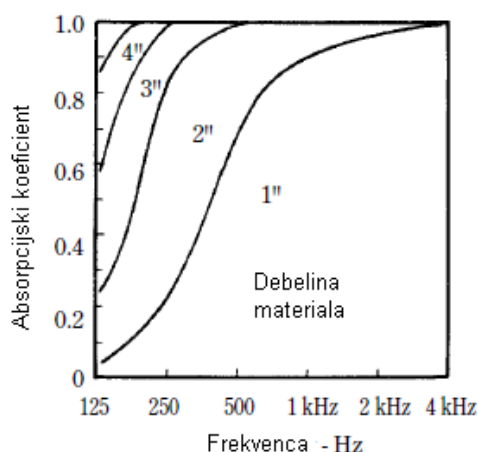
$$a = \sum_i \alpha_i S_i. \quad (5)$$

S_i je površina absorpcijskega materiala z energijskim absorpcijskim koeficientom α_i . V večini tabel z materiali bomo našli Sabinov absorpcijski koeficient, saj je z njim lažje računati. Absorpcijski koeficient merimo v odmevnica. Vzorec merjenja postavimo v prazno odmevnico in izmerimo odmevni čas ter ga primerjamo s karakterističnim odmevnim časom prazne odmevnice. Iz tega se nato izračuna absorpcijski koeficient. Po definiciji ima odprto okno ploščine 1 m^2 Sabinov koeficient enak 1, saj se zvok ne odbije nazaj v prostor. Lahko se tudi dogodi, da se zvok lomi na robovih vzorca, kar nam prinese absorpcijski koeficient, ki je večji od 1. V teh primerih proizvajalec poda absorpcijski koeficient kot dobljeno vrednost (večje od 1) ali ga zaokroži na 1 [3].

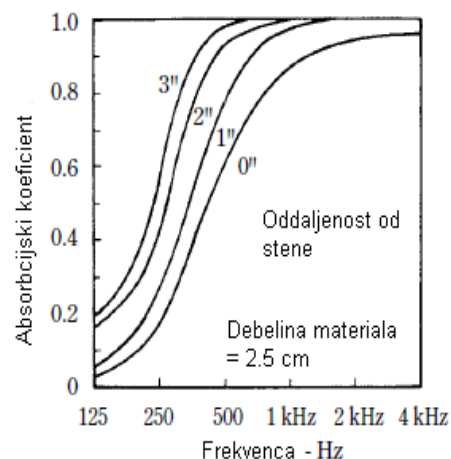
Najšibkejši točki pri izolaciji sobe sta okna in vrata. Masni zakon še vedno velja, a le pri vratih lahko dosežemo večjo površinsko gostoto. Protihrupna vrata so izdelana iz težjih materialov, kot so različne kovine, in na zunanjih straneh obdane z absorberji. Pozornost je treba nameniti tudi stiku vrat z okvirjem. Stik mora biti tem bolj tesen in iz materialov, ki bodo absorbirali strukturne vibracije. Zato za stik uporabimo gumo. Če si ne moremo privoščiti kvalitetnih protihrupnih vrat, jih lahko poizkusimo sami izdelati. Najlažji načina je, da standardna vrata ojačamo in napolnimo s peskom [3]. To bo poskrbelo za povečanje površinske gostote. Večje težave imamo pri izbiri oken. Zaradi narave oken bomo težko dosegli visoko dušenje, a s pravilno izbiro lahko dosežemo izgube celo do 50 dB. Dvojna okna so najboljša izbira pri protihrupni zaščiti (trojna okna so zanemarljivo boljša od dvojnih). Pri dvojnih oknih je najboljšo, da uporabimo tem debelejšo steklo, po možnosti naj bosta stekli različnih debelin. Zunanje steklo naj bo rahlo vbočeno. Razdalja med ploščama naj bo med 10 cm in 20 cm (nad 20 cm ni bistvenih izboljšav) [3]. Stik med steklom in okvirjem naj bo izoliran z gumo. Na okvirju med ploščama naj bo absorber, ki bo preprečeval resonanco v votlini med ploščama stekla [3, 5].

Visoko- in srednjefrekvenčni absorberji

Visoko- in srednjefrekvenčni absorberji so v večini primerov porozni materiali v obliki panelov, pene, zaves, blazin, preprog... Pri tem moramo paziti, da material ni preveč redek, saj je v tem primeru pretvorba zvoka v toploto majhna, če je pa preveč gost, je aktivna površina manjša in posledično se manj zvoka absorbira. Zmožnost absorpcije zvoka je odvisna od debeline absorberja (slika 6) kot tudi od oddaljenosti absorberja od stene (slika 7).



Slika 6: Odvisnost absorpcijskega koeficienta od frekvence pri različnih debelinah absorberja (steklena volna): 2.5 cm (1"), 5 cm (2"), 7.5 cm (3") in 10 cm (4") [3].



Slika 7: Odvisnost absorpcijskega koeficienta od frekvence pri različnih oddaljenostih od stene (za stekleno volno): 0 cm (0"), 2.5 cm (1"), 5 cm (2") in 7.5 cm (3") [3].

To, da se učinkovitost absorberja povečuje z večanjem razdalje od stene, nam zelo ustreza, saj lahko s cenejšim in tanjšim absorberjem dosežemo enako absorpcijo kot z debelejšim in dražjim absorberjem. Zaves nam lahko služijo kot zelo učinkoviti absorberji, a v majhnem frekvenčnem območju. Če postavimo zaveso za $\lambda/4$ od stene (λ je valovna dolžina motečega hrupa) bomo dosegli skoraj popolno dušenje hrupa te valovne dolžine in lihih večkratnikov te valovne dolžine. Na žalost se to dogaja na zelo ozkem frekvenčnem področju in je zato zavesa neprimerna kot primarni absorber. Preproge tudi močno vplivajo na absorpcijo visokih frekvenc v prostoru. Frekvenčna odvisnost je odvisna od sestave preproge in podloge [3].

Helmholtzev resonator

Helmholtzev resonator naj bi bil najstarejši poznani resonator in dušilec nizkih frekvenc. Uporabljal se je v srednjeveških cerkvah na Švedskem in Danskem. Uporabljali so ga tudi stari Grki in Rimljani v obliki velikih keramičnih posod pri gledališčih na odprtem. Helmholtzev resonator duši določene frekvence (odvisno od dimenzij resonatorja) in deluje kot resonator. Za ostale frekvence deluje kot izvor zvoka (na ustju oddaja sferične valove) in je tako v gledališčih poskrbel za nastanek odmeva v sicer neodmevnem okolju. Osnovni Helmholtzev resonator je sferične oblike, z ozkim vratom in odprtino na vratu (slika 8). Frekvenčni razpon dušenja je ozek, ki ga lahko razširimo tako, da v notranjost resonatorja damo porozni absorber.



Slika 8: Helmholtzev resonator iz medenine, izdelan po originalni zasnovi Helmholtza [4].

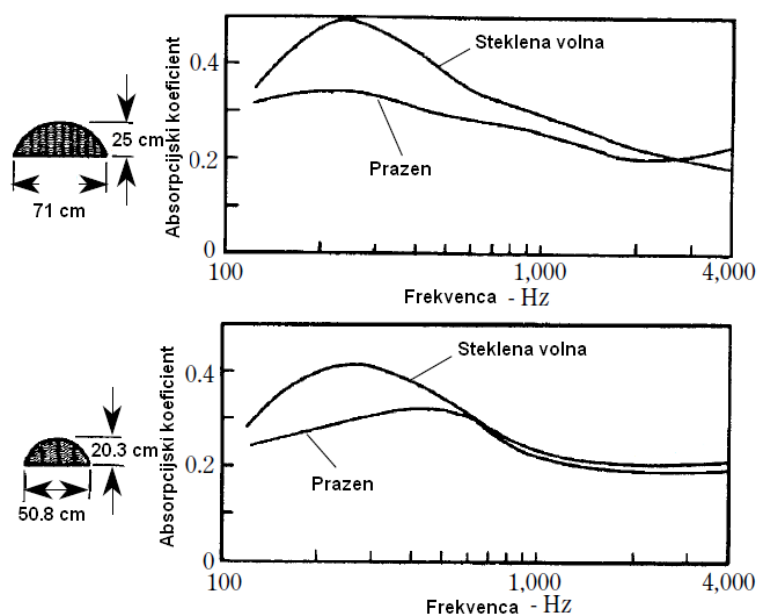
Helmholtzev resonator je lahko tudi kockaste oblike z okroglo odprtino na vrhu in debelino zgornje stranice, ki je enaka debelini vratu. Frekvenca dušenja je odvisna od dimenzij resonatorja. Za kockast resonator se frekvenca dušenja izračuna po enačbi (6):

$$f_d = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV_0}}, \quad (6)$$

kjer je S površina odprtine, L dolžina vratu, c hitrost zraka in V_0 prostornina votline. Dobra stran Helmholtzevih resonatorjev je, da več resonatorjev, zloženih drug poleg drugega, delujejo enako kot prej, čeprav odstranimo stranice, ki jih ločujejo. To precej poenostavi izdelavo in postavitve teh resonatorjev [3].

Policilindrični absorberji

Policilindrični absorberji so mogoče najboljša izbira od nizko frekvenčnih absorberjev, saj poleg absorpcije s svojo ovalno obliko, poskrbijo za difuzijo zvoka. To je posebej zaželeno v glasbenih dvoranh in zvočnih studiih, kjer hočemo imeti izotropno zvočno polje. Relativno preprosta konstrukcija pripomore k cenovni ugodnosti izdelave teh absorberjev. Absorpcijske lastnosti policilindričnih absorberjev so odvisne od širine in debeline absorberja, ne pa tudi od višine absorberja. Absorpcijske lastnosti lahko še izboljšamo, če notranjost absorberja napolnimo z poroznimi materiali (slika 9). Bolj razširjeno uporabo policilindričnih absorberjev omejuje njihova velikost, saj za absorpcijo nižjih frekvenc potrebujemo večje absorberje, ter njihov estetski videz (slika 10) [3].



Slika 9: Absorpcijski koeficient v odvisnosti od frekvence pri dveh dimenzijah policilindričnega absorberja. Podana tudi primerjava med praznim absorberjem in absorberjem, napolnjenim s stekleno volno. Vidimo, da se s povečanjem dimenzije absorberja poveča tudi absorpcijski koeficient [3].



Slika 10: Policilindrični absorberji na stropu v zvočnem studiu. Na stenah so vidni tudi srednje- in visokofrekvenčni absorberji [7].

Zvočne ovire

Poglejmo si, kakšne zvočne ovire lahko postavimo med izvor in poslušalca. Najboljša rešitev, da se tem bolj oddaljimo od izvora hrupa. Če podvojimo oddaljenost od izvora za dvakrat, se bo raven hrupa zmanjšala za približno 6 dB. Uporabimo lahko tudi rastline, ki bodo hrup deloma odbile in deloma absorbirale. Ograda iz cipres, debela približno 60 cm, nam bo raven hrupa zmanjšala za 4 dB [3]. Največkrat pa uporabimo protihrupne ograje. Absorpcijske površine teh ograd so zgrajene iz akrilnih (dobro prenesejo temperaturno raztezanje, so mehansko odporne in prozorne) (slika 11) ali neprozornih materialov (vezan les) (slika 12).



Slika 11: Akrilna protihrupna ograja debeline 15 mm na dolnji avtocesti v bližini Čadeža ob Savi [8].

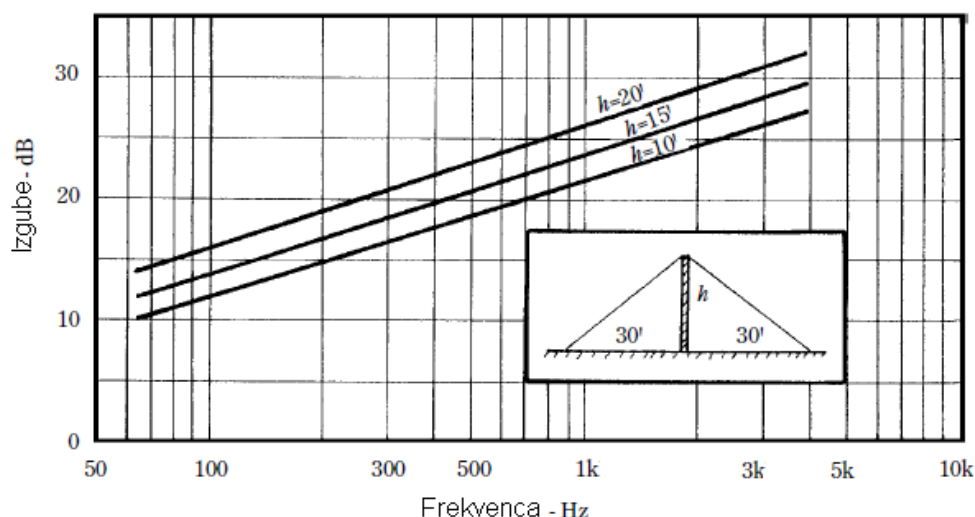


Slika 12: Neprozorna protihrupna ograja poleg avtoceste v Sloveniji [9].

Akrilne protihrupne ograje se uporabljajo na cestah, kjer hočemo, da imajo vozniki razgled na okoliške kraje. Te ograje vplivajo ugodneje na voznike kot neprozorne, saj razgled vpliva pozitivno na psiho voznikov. Pri neprozornih imajo nekateri vozniki občutek deorientacije in lahko tudi občutek utesnjenosti. Na akrilnih ograjah pogosto vidimo motiv ptice. Ta ni tam zaradi estetike, temveč zaradi varstva ptic. Na ograjah je obris sokola in se ga ostale ptice izogibajo, tako da je zelo majhna verjetnost, da bi se lahko ptica zaletela v ograjo.

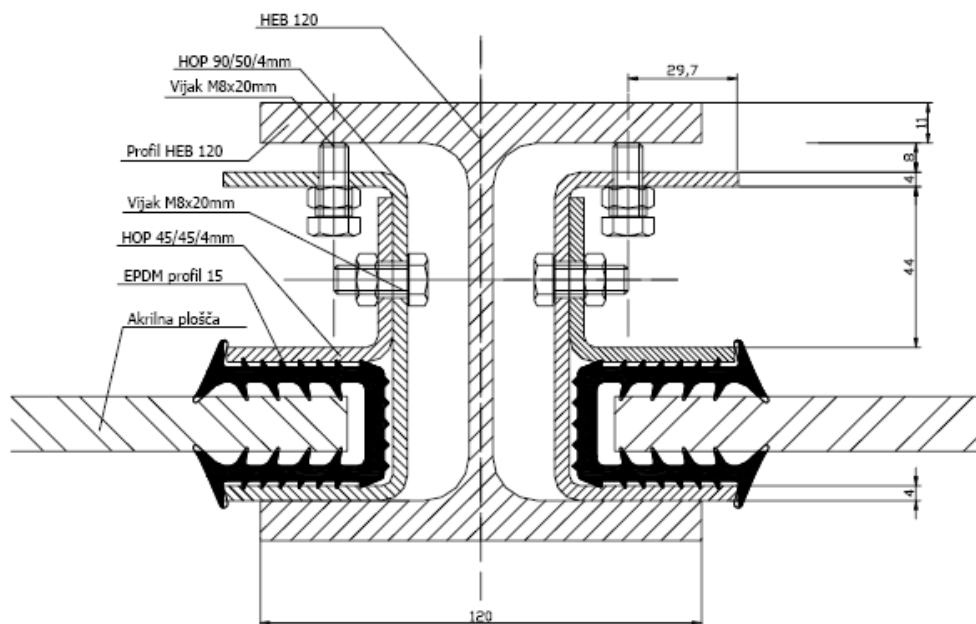
Zvok se na protihrupnih ograjah absorbira ter tudi odbije. Frekvenčna odvisnost absorpcije ograje je odvisna od materialov, iz katerih je sestavljena odbojna površina. Frekvenčna odvisnost odboja od ograje ni odvisna od konstrukcije, samo od dimenzije. Pri visokih frekvencah je odboj skoraj popoln in se zelo malo zvočnega polja širi v območje geometrijske sence. Težava nastane, ko je dimenzija ograje primerljiva z valovno dolžino zvoka, saj se takrat širi tudi v območje geometrijske sence. To se zgodi pri frekvencah zvoka, ki so manjše od 100 Hz. Na žalost je tudi absorpcija teh ograd v nizkofrekvenčnem območju zelo šibka, zato te ograde prepuščajo večino nizkofrekvenčnega hrupa (slika 13) [3].

Protihrupno zaščito lahko še dodatno izboljšamo, če v okolici avtoceste napravimo nasip, na vrh nasipa pa postavimo protihrupno ograjo. Nasip deluje kot absorber in reflektor. Če naj deluje optimalno, mora biti širina nasipa najmanj štirikratnik višine [10]. To nam močno omeji uporabo nasipov, kot protihrupno zaščito v urbanih krajih. V Sloveniji imamo kar nekaj takih nasipov ob avtocestah (ljubljska obvoznica, del gorenjske avtoceste...). Podobno kot neprozorne ograje imajo tudi nasipi negativen vpliv na voznike zaradi pomanjkanja orientacijskih točk [10].



Slika 13: Zvočne izgube v odvisnosti od frekvence pri različnih višinah protihrupne ograje: 3 m ($h=10'$), 4.5 m ($h=15'$) in 6 m ($h=20'$). Izvor in poslušalec sta od ograje oddaljena 9.15 m vsak na svoji strani [3].

Sestava protihrupnih ograj je bolj zapletena, kot se nam na prvi pogled zazdi. Da bi bila protihrupna ograja tem bolj učinkovita, mora zmanjševati hrup na vse tri načine, ki so bili opisani v prejšnjih poglavjih. Za absorpcijo in strukturni prenos je pomembno, da je absorpcijska plošča sestavljena iz materialov, ki imajo velik absorpcijski koeficient in veliko površinsko gostoto. Pri prozornih ograjah je to veliko težje doseči kot pri neprozornih, kjer lahko uporabimo kompozite. Za učinkovit membranski efekt je pomemben stik plošče z nosilnim stebričkom (slika 14) [3].



Slika 14: Horizontalni prerez pritrditve na steber kovinskega panela z ravno akrilno ploščo za ravne kovinsko-akrilne protihrupne ograje podjetja Svea. Ob stiku akrilnih plošč z nosilcem je položena guma, da duši valovanje, ki ga plošči vzbuja zvočno valovanje iz ceste (hrup) in tvori stik med nosilcem in ploščo navkljub različnim temperaturnim raztezkom [11].

Protihrupne ograje pridejo v različnih oblikah. Do sedaj smo govorili o ravnih ograjah, sedaj si bomo pa pogledali še druge oblike. V krajih, kjer so naselja od prometnice zadosti oddaljena uporabljamo ravne protihrupne ograje. Težava nastane, ko so naselja oz. bivališča zelo blizu prometnice. V tem primeru poizkušamo povečati izgube v bližini ograje, to pa storimo tako da ograjo nagnemo (slika 15). S tem poskrbimo, da se zvok odbije kvišku in se ne ustvari stacionarno zvočno polje med ograjama. Zaradi nagnjenosti mora biti ograja višja kot pri ravni, saj bi v nasprotnem primeru več nizkofrekvenčnega hrupa prešlo ograjo [10].

Postavitve protihrupnih ograj niso naključne. Za vsako okolico, kjer ugotovijo povečano raven hrupa in so pripravljeni investirati v protihrupno zaščito, z računalniškimi simulacijami določijo optimalno postavitev protihrupne zaščite. Upoštevati morajo lokalno geografijo, saj odločilno vpliva na širjenje zvoka v okolici [3, 10].



Slika 15: Nagnjena transparentna protihrupna ograja debeline 15 mm na ljubljanski obvoznici. Nagnjena protihrupna ograja je tukaj uporabljena zaradi bližine bivališč [8].

Hrup v mestih

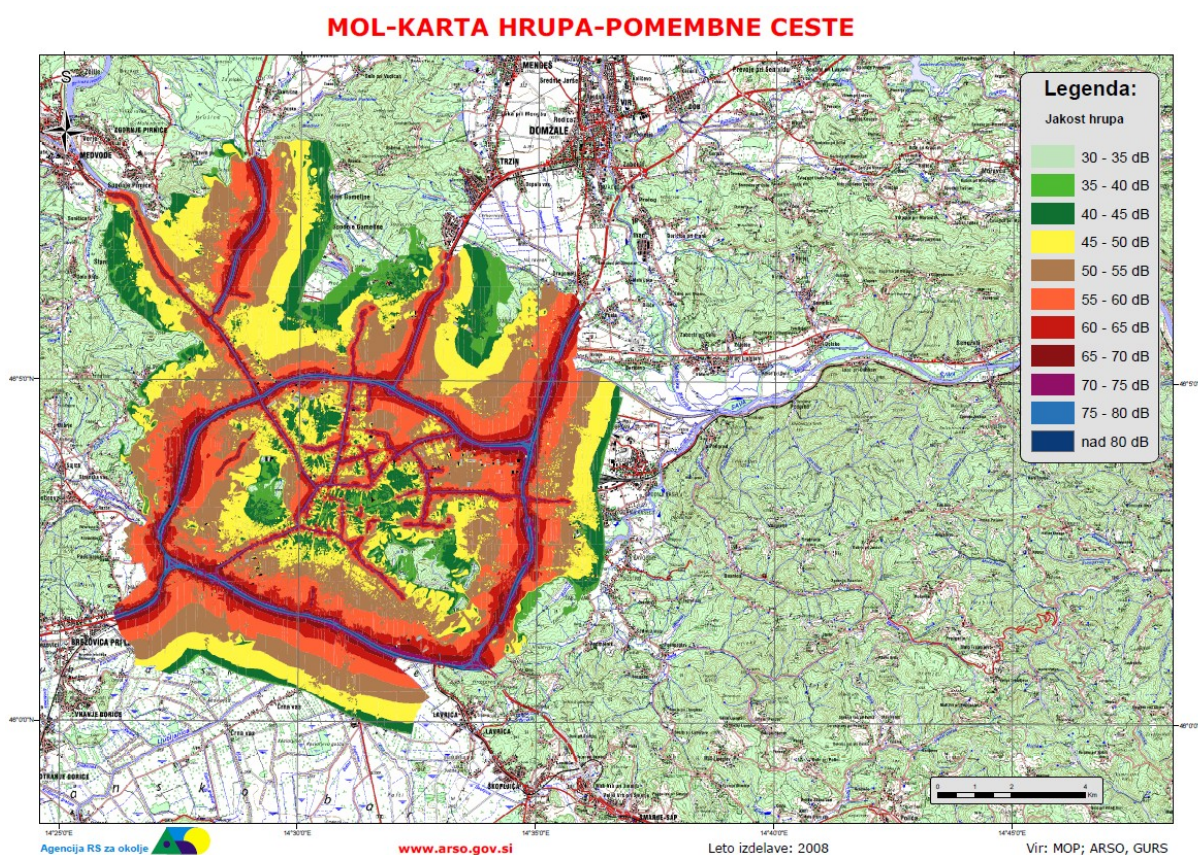
Hrup je pomemben dejavnik življenja v mestih, še posebej ob prometnejših cestah, železnici in v okolici industrijskih obratov. Bivališča v okolici industrijskih obratov so deležna povečane ravni hrupa predvsem v dnevnem času, medtem ko so bivališča v okolici železnic in cest deležna povišane ravni hrupa tudi ponoči. Proti hrupu se lahko sami zaščitijo na ravni stanovanja, kot je opisano v prejšnjih poglavjih, v zadnjih nekaj desetletjih so pa tudi mestne in državne oblasti aktivno pristopile k reševanju problematike hrupa.

Klasične protihrupne ograje so v mestih precej manj učinkovite in lahko v posebnih primerih celo poslabšajo hrup v okolici. Nagnjene protihrupne ograje ob prometnici v blokovskem naselju bi recimo izboljšale hrup v nižjih nadstropjih, medtem ko bi se v višjih nadstropjih zaradi odboja poslabšal. Še večjo težavo lahko predstavljajo ravne ograje. V prostoru med protihrupno ograjo in

zgradbo lahko nastane nizkofrekvenčna resonanca in raven hrupa lahko preseže osnovni hrup brez prisotnosti ograje [9].

Hrup v Sloveniji

Ljubljana ni izjema pri problematiki hrupa. Hrup v okolici glavnih prometnic in obvoznice v določenih odsekih presega dovoljene ravni (slika 16). Pri obvoznici so že pri načrtovanju poizkušali zmanjšati raven hrupa tako, da so poglobili obvoznico in na vrhu zgradili protihrupne ograje. V centru mesta so nekaterih mestih zgradili protihrupne zidove. V uporabi je tudi tako imenovani „tihi“ asfalt.



Slika 16: Jakost hrupa v Ljubljani v dnevno-nočnem času. Opaziti je povečano jakost hrupa v okolici obvoznice in glavnih vpadnic [12].

Že nekaj časa se v Evropi uporablja „tihi“ asfalt. Ta poimenovanje se uporablja za različne vrste asfalta, ki povzroča manj hrupa kot standardni asfalt. Pri nas se uporablja peskov mastiks asfalt in bolj učinkoviti porozni asfalt. V ZDA so se preusmerili v izdelavo cest iz gumi asfalta, ki tudi močno zmanjša hrup in je bolj vzdržljiv kot klasičen asfalt. Primerjavo glasnosti pri različnih hitrostih in materialih kaže tabela 1 [13].

Tabela 1: Primerjava glasnosti pri različnih hitrostih in na različnih vrstah asfalta. Meritve so bile izvedene na slovenskih cestah [13].

hitrost (km/h)	asfalt-beton (dBA)	peskov mastiks asfalt (dBA)	porozni asfalt (dBA)
50	71,7	69,1	65,7
70	77,4	75,2	70,5
90	80,7	78,7	73,5
110	83	81,3	75,5
število odsekov	12	16	2

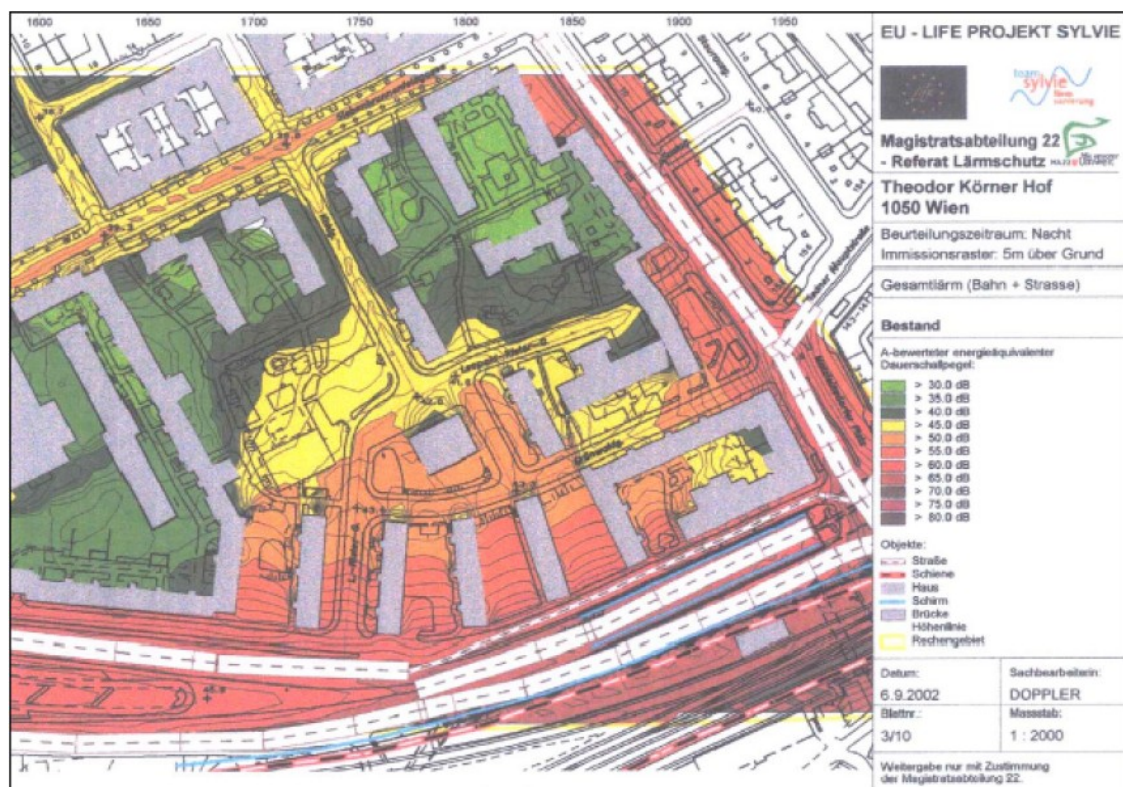
Skupaj z gradnjo avtocest se je na Slovenskem vršila tudi gradnja protihrupnih ograj. Trenutno je v Sloveniji za 137 km protihrupnih ograj. Za zaščito vseh potrebnih območij bi potrebovali vsaj še enkrat tolikšno dolžino protihrupnih ograj [9].

Primeri protihrupne zaščite v mestih

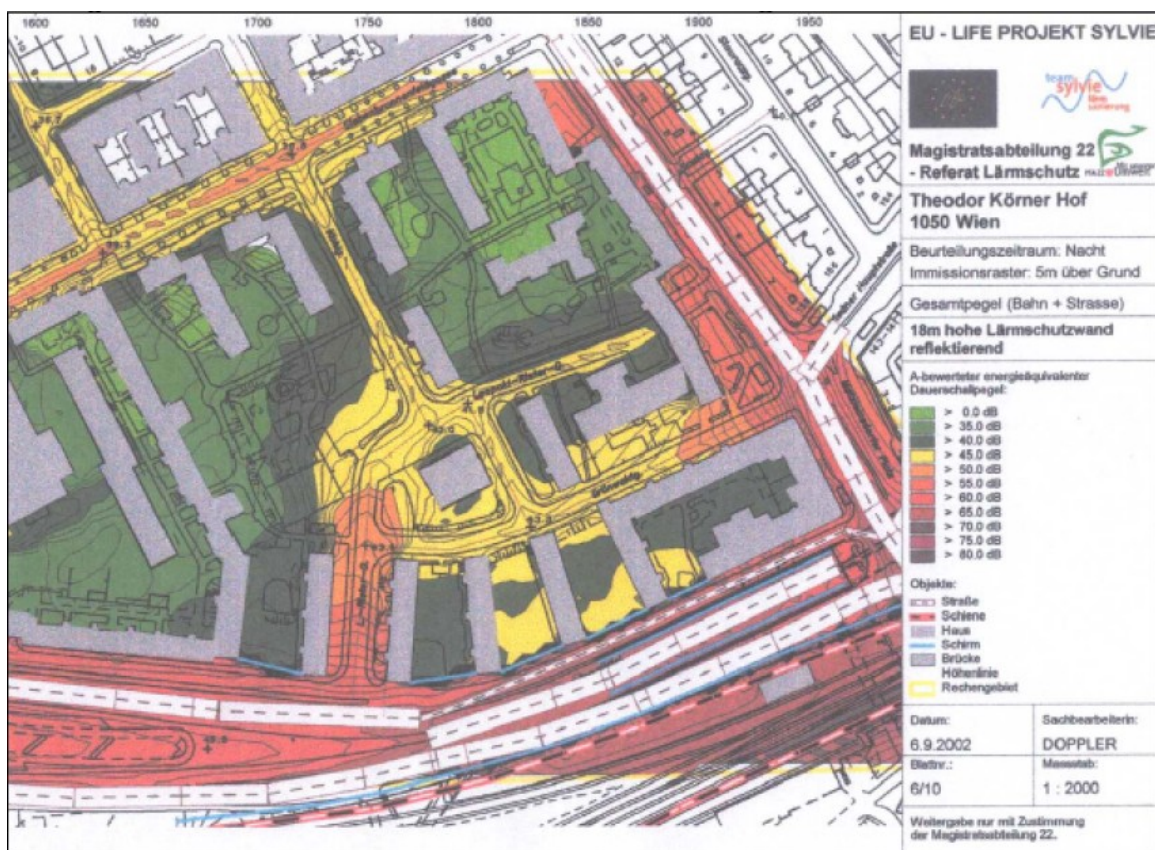
Za primer uspešne protihrupne zaščite v mestu bomo vzeli stanovanjsko naselje Theodor- Körner-Hof na Dunaju. Tu so poleti 2007 zaradi velike ravni hrupa zgradili 18 m visok in 150 m dolg protihrupni zid (slika 17). Za izdelavo zidu so uporabili prozorne materiale, da je lahko dvorišče normalno osvetljeno. Na vrh zidu so postavljene sončne celice, ki proizvajajo elektriko in jo oddajajo v javno električno omrežje. To je bil pionirski projekt Dunaja in Evropske unije, v okviru katerega so tudi namestili mrežo opazovalnic hrupa po vsem Dunaju. Stanje pred postavitvijo prikazuje slika 18, stanje po postavitvi pa slika 19 [1, 4].



Slika 17: Protihrupni zid v stanovanjskem naselju Theodor-Körner-Hof. Zaradi močno povečanega hrupa v naselju so v sodelovanju z EU izpeljali pionirski projekt protihrupne zaščite. Na vrhu vidimo sončne celice [4].



Slika 18: Raven hrupa v stanovanjskem naselju Theodor-Körner-Hof pred postavitvijo protihrupnega zidu. Vidna je visoka jakost hrupa na dvoriščih med stanovanjskimi stavbami [1].



Slika 19: Raven hrupa v stanovanjskem naselju Theodor-Körner-Hof po postavitvi protihrupnega zidu. Nivo hrupa med stavbami je občutno nižji kot pred postavitvijo zidu [1].

Zaključek

V tem seminarju smo predstavili nekatere pristope, ki se trenutno uporabljajo pri zaščiti proti hrupu. Akustika oz. protihrupna zaščita precej kompleksen problem. [3].

Protihrupno zaščito lahko izboljšamo na mnoge preproste in relativno poceni načine. Z izbiro pravih materialov in pravilne postavitve lahko dosežemo enak učinek kot z dragimi materiali, namenjenimi posebej za akustiko. Zanimiv se zdi tudi projekt zmanjšanja hrupa na Dunaju. Rešitev je učinkovita, toda dvomljivo je, da se bo tak pristop uporabljal na širši ravni. Bolj verjetno je, da se bodo v prihodnosti prilagodili izdelovalci vozil in delali tišja vozila, še posebej če bodo prevladala električna vozila nad bencinskimi.

Trenutno potekajo raziskave na tako imenovani aktivni protihrupni zaščiti. Uporabljala naj bi se v industrijskih območjih s konstantnimi ravni hrupa. Aktivno zaščito bo sestavljal sistem zvočnikov, mikrofонов in centralne računske enote. Mikrofonji bodo na različnih lokacijah zaznavali zvočno polje, računska enota bo podatke procesirala ter izračunala, kakšen zvok morajo oddajati zvočniki, da bodo izničili hrup. Obstaja tudi možnost uporabe zvočnih ogrinjal, a je ta tehnologija v povojih [1, 3, 4, 10].

Literatura

- [1] E. Prelovšek, *Protihrupna zaščita*, seminar pri predmetu RRPSE (2003).
- [2] Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju, Ur.l. RS, št. 105/2005.
- [3] F. A. Everest, *The Master Handbook Of Acoustics 4th edition* (McGraw-Hill, New York, 2001).
- [4] www.wikipedia.com (11. 5. 2009).
- [5] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. Holger Rindel, A. Christian Gade in M. Ohlrich, *Fundamentals of Acoustics and Noise Control* (Technical University of Denmark, Ørsted, 2007).
- [6] R. E. Halliwell, T. R. T. Nightingale, A. C. C. Warnock in J. A. Birta, *Gypsum Board Walls: Transmission Loss Data* (Conseil national de recherches Canada, 1998).
- [7] www.orionsound.com (27. 5. 2009).
- [8] www.akripol.si (22. 5. 2009).
- [9] www.motorevija.si (22. 5. 2009).
- [10] M. Long, *Architectural Acoustics* (Elsevier, San Diego, 2006).
- [11] http://www.svea.si/filelib/pc_plastika/inovacija.pdf (12. 5. 2009).
- [12] <http://www.arso.gov.si/> (11. 5. 2009).
- [13] G. Descornet in L. Goubert, *Noise classification of road pavements* (European Commission Directorate-General Environment, 2006).