

Osrednja tema

# Protihrupni ukrepi ob naših cestah in možnosti njihove izboljšave

**Avtor:**  
**Ferdinand Deželak,**  
**ZVD Zavod za varstvo pri delu**



## UVOD

Izpostavljenost visokemu hrupu je povezana s prenosom škodljive energije na naše telo, kar lahko povzroči neposredne zdravstvene okvare (naglušnost), kakor tudi posredne okvare (ponavljajoče se stresne situacije namreč lahko povzročijo različna kardiovaskularna in nevrovegetativna obolenja). Najpogostejše oziroma najbolj problematične hrupne vire, ki se pojavljajo v okolju, lahko razdelimo v naslednje skupine: cestni, železniški, letalski in ladijski promet, gradbišča, industrijske dejavnosti, obrtne in storitvene dejavnosti, rekreacijske aktivnosti ter drugi viri (na primer hrup sosedov, dejavnosti izvzete iz predpisov, hrup naravnega izvora).

V bivalnem okolju daleč najpomembnejši vir hrupa predstavlja cestni promet. Zato so njegovi upravljavci zavezani k izvajanju določenih protihrupnih ukrepov, ki naj bi zagotovili, da izpostavljenost cestnemu hrupu ne bi presežala vsaj z zakonom določenih omejitev v okolju.

## REŠEVANJE PREKOMERNEGA HRUPA

Izvajanje ukrepov za varovanje pred prekomernim prometnim hrupom ni novost današnjega časa. Znano je, da je že rimski cesar Julij Cezar izdal prepoved vožnje kočijam z železom okovanimi kolesi po tlakovanih rimskih ulicah v nočnem času zaradi neznosnega hrupa oziroma pritožb nad njim.

Načrtovanje in rekonstrukcije pomembnejših prometnih infrastrukturnih objektov običajno zahtevajo tudi upoštevanje in izvedbo ustreznih protihrupnih ukrepov. Postavlja se vprašanje, kdo naj pri takšnih ukrepih sodeluje. Zmotna je namreč običajna praksa o nujnosti sodelovanja zgolj investitorja in izbranega izvajalca (s strani investitorja), še zlasti v primeru problematičnih hrupnih virov in financiranja iz proračunskega denarja.

Za doseganje optimalnega učinka protihrupnih ukrepov bi morale sodelovati različne inštitucije oziroma strokovnjaki z različnih področij, kot so:

- » zakonodajalci, politiki oziroma predstavniki vlade;
- » akustični konzultanti;
- » lastniki oziroma upravljavci hrupnih prometnic;
- » proizvajalci in dobavitelji protihrupne opreme;
- » naravovarstveniki;
- » prizadeti stanovalci.

Problem morebitne prekomerne obremenitve s hrupom je najzanesljiveje rešljiv, če vsaka izmed navedenih skupin postavi čim konservativnejšo zahtevo, na primer:

- » zakonodajalci, politiki oziroma predstavniki vlade predpišejo najstrožje kriterije oziroma omejitve;
- » akustični konzultanti upoštevajo velike varnostne faktorje oziroma predimenzioniranje;
- » lastniki in upravljavci prometnic vztrajajo pri izpolnjevanju postavljenih protihrupnih zahtev;
- » proizvajalci in dobavitelji protihrupne opreme podobno

kot konzultanti upoštevajo večje varnostne faktorje oziroma predimenzioniranje;

- » naravovarstveniki, ki upoštevajo prednosti in pomanjkljivosti škodljivih posegov in njihovih omilitvenih ukrepov v širšem, okoljevarstvenem smislu;
- » prizadeti stanovalci lobirajo pri politikih s ciljem uveljavljanja čim strožjih kriterijev.

Seveda pa obstaja tudi druga plat takšnega ekstremnega konservativizma, to je pretirana protihrupna zaščita, ki načeloma ne bi bila nujno potrebna. Vse to lahko občutno poveča stroške celotne investicije. Še huje pa je podcenjevanje izvedbe potrebnih protihrupnih ukrepov, kar dolgoročno lahko pomeni nesprejemljivost celotne investicije in dopustitev tveganja zakonskih prekoračitev ter nastanka zdravstvenih okvar in drugih posledic za prizadeto prebivalstvo. Zato je nujno, da so navedene skupine dovolj povezane med seboj oziroma da ne delujejo preveč neodvisno druga od druge.

## VRSTE PROTIHRUPNIH UKREPOV

Protihrupne ukrepe lahko v splošnem razdelimo na tri skupine:

- a. primarni – na viru;
- b. sekundarni – na poti razširjanja hrupa od njegovega vira do za hrup občutljivih objektov;
- c. terciarni – na izpostavljenih objektih.

Temeljni predpis, ki pri nas omejuje okoljski hrup, je Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Ur. list RS št. 105/2005) z dopolnitvami. Ta zahteva, da morajo biti zagotovljeni ukrepi varstva pred hrupom oziroma ukrepi za preprečevanje in zmanjšanje hrupa v okolju kot posledice obratovanja vira hrupa.

Pri izbiri ukrepov varstva pred hrupom imajo ukrepi zmanjševanja emisije hrupa pri njenem izvoru prednost pred ukrepi preprečevanja imisije oziroma širjenja hrupa v okolju. Velja torej prioriteta izvajanja protihrupnih ukrepov. To pomeni, da se je v prvi vrsti potrebno posluževati primarnih protihrupnih ukrepov in šele nato sekundarnih, medtem ko so terciarni ukrepi na repu prioritete liste izvajanja protihrupnih ukrepov. V ta namen se običajno predhodno izdelata protihrupni elaborat z vsemi potrebnimi analizami.

Ne glede na dejstvo, da hrup cestnega prometa predstavlja daleč najbolj problematičen vir hrupa v okolju, se mu pri nas še vedno posveča bistveno premalo pozornosti. Primarni ukrepi se pri tem zelo redko izvajajo. Glavna pozornost je usmerjena zgolj k sekundarnim ukrepom in še to k povsem neoptimiziranim, kar pogosto povzroča slabo učinkovitost in visoke stroške.

### Primarni ukrepi

Neposredni nadzor in še zlasti protihrupni ukrepi na vozilih kot virih hrupa so zelo težko izvedljivi v praksi. Večina cest je namreč javnih, kar dopušča prisotnost izredno široke palete najrazličnejših vozil. Obstajajo sicer zakonske omejitve za maksimalno hrupnost novih vozil, ki veljajo za njihove proizvajalce.

# V bivalnem okolju daleč najpomembnejši vir hrupa predstavlja cestni promet.

Obstajajo tudi prepovedi predelovanja vozil, tako da bi povzročala povečane emisije hrupa, kot na primer vožnja brez dušilnikov hrupa na izpušnih ceveh.

V zadnjem času se pojavlja tudi trend naraščanja deleža električnih vozil, ki so bistveno tišja od vozil z motorji z notranjim izgorevanjem, še zlasti pri majhnih hitrostih. Pri velikih hitrostih (še zlasti na avtocestah) pa še vedno ostaja problem hrupa zaradi interakcije gum in vozišča tudi pri električnih vozilih. Po drugi strani pa uspešnost tovrstnih primarnih protihrupnih ukrepov v znatni meri zmanjšuje trend stalnega naraščanja števila vozil, še zlasti v primeru težkega tovornega prometa.

Primarni ukrepi, izvedljivi pri cestnoprometnem hrupu, so lahko organizacijske, tehnične oziroma kombinirane narave. Kot primer organizacijskih ukrepov velja omeniti omejevanje hitrosti, ki pa se pri nas žal dokaj neučinkovito izvaja, še zlasti na avtocestah. Nadaljnji tovrstni ukrep predstavlja tudi organizacija prometa, kot na primer omejitve voženj težkih vozil ter omejitve v nočnem času. Žal smo v zvezi s tem pogosto žrtev zunanjih pritiskov (na primer raznih avtoprevoznških lobijev, kot tudi politikov nekaterih evropskih držav, katerih cilj je narediti našo državo tranzitno). Končno velja omeniti še eno vrsto ukrepov iz te skupine, to sta predvsem izobraževanje in stimulacije voznikov v smeri zmernih, bolj ekoloških voženj. Neenakomerne vožnje, spremljane z velikimi pospeševanji in zaviranjem vozil so na primer povezane ne samo z njihovimi hitrejšimi okvarami ter večjo porabo goriva, temveč tudi s povečanjem emisij škodljivih snovi v zrak in emisij hrupa. Skladno z drugim Newtonovim zakonom zahteva hitrejša pospeševanja uporabo večjih sil in s tem energije, katere del se pretvori tudi v povišano zvočno energijo, oddano v okolje, oziroma hrup.

Kot primer tehničnih primarnih ukrepov pa se v svetu učinkovito izvaja predvsem gradnja manj hrupnih vozišč. Na tem področju se ponujajo dobri obeti znižanja emisij za 5 do 8 dBA, še zlasti na avtocestah, kjer so prisotne višje hitrosti vozil. Pri tem je seveda potrebno poskrbeti tudi za redno vzdrževanje tovrstnih vozišč, saj zvočnoabsorpcijske oziroma protihrupne značilnosti tovrstnih preplastitev vozišč s starostjo upadajo. Zaradi tega se z leti povečuje emisijska (in seveda tudi imisijska) raven cestnoprometnega hrupa, v kolikor se protihrupna preplastitev ne obnavlja redno.

Naraščanje tovrstne emisijske ravni hrupa  $L$  lahko za primer drenažnih asfaltov, ki se pri nas pogosto uporabljajo, opišemo z eksponentno odvisnostjo:

$$L = a - be^{-\frac{t}{c}}$$

pri tem je:  $t$ : starost preplastitve [leta];  $a$ : končna raven hrupa, do katere pride po zelo dolgem času  $t \rightarrow \infty$  [dB];  $b$ : začetno znižanje ravni hrupa glede na končno raven [dB];  $c$ : faktor akustičnega staranja [leta].

Navedeni faktorji so odvisni tudi od vrste ceste. Na primer pri avtocestah je izraba plasti zaradi velikih obremenitev hitrejša kot na drugih cestah. Tipičen numerični primer za preplastitev SMA pri hitrosti 110 km/h lahko na primer opišemo z naslednjimi faktorji:

$a = 92,4$ ;  $b = 11$ ;  $c = 2,5$  in s standardno deviacijo  $s = \pm 0,49$

Pomemben tehnični ukrep v tej smeri predstavlja tudi uporaba manj hrupnih gum. Skladno z zahtevami EU je od leta 2012 predpisano obvezno označevanje kategorij hrupnosti gum za njihove proizvajalce, predpisi pa se v zvezi s temi ukrepi še zaostrojujejo.

## Sekundarni ukrepi

V primeru, ko primarni ukrepi niso možni ali pa so težko izvedljivi, se v praksi poslužujemo sekundarnih ukrepov. Mednje sodijo predvsem posaditev širokih drevesnih pasov, postavitve zemeljskih nasipov in nazadnje gradnja protihrupnih pregrad. O njih bo več govora v nadaljevanju.

## Terciarni ukrepi

K terciarnim ukrepom sodi predvsem povečanje zvočne izolirnosti občutljivih fasadnih elementov (okna, vrata) na izpostavljenih stavbah. Vendar pa na ta način dodatno obsodimo izpostavljene stanovalce na bivanje pri zaprtih oknih. Kot alternativa je sicer možna tudi dodatna vgradnja protihrupnih prezračevalnikov, kar pa stroške takšnih terciarnih ukrepov običajno vsaj podvoji.

Terciarni ukrepi ne varujejo okolja pred hrupom v širšem smislu, temveč samo določene prostore v stavbah. Zato se nahajajo na repu prioritete protihrupnih ukrepov oziroma predstavljajo zgolj izhod v sili.

## PROTIHRUPNE PREGRADE

Pri nas se žal še vedno daje prednost izključno gradnji raznih umetnih protihrupnih pregrad, ki je ne samo tehnično manj učinkovita, temveč predstavlja tudi velik strošek oziroma pritisk na davkoplačevalski denar. Da takšna gradnja ni poceni, priča že dejstvo, da izvajalci za samo 1 m<sup>2</sup> takšne pregrade zaračunajo več sto evrov. To seveda predstavlja izredno dobičkonosno dejavnost, ki pa dostikrat ne opraviči vloženih sredstev, saj so dobljeni rezultati znižanja hrupa običajno precej skromni. Protihrupne pregrade, še zlasti ravne, ki se gradijo pri nas, sodijo namreč med najmanj učinkovite ukrepe glede na vložena sredstva, a se pri nas žal še vedno daleč največ uporabljajo. Pri nas je opazna tudi gradnja pregrad, ki so nagnjene stran od vozišča.



Slika 1: Ustaljena praksa naših načrtovalcev: visoke, nagnjene in enostavne protihrupne pregrade

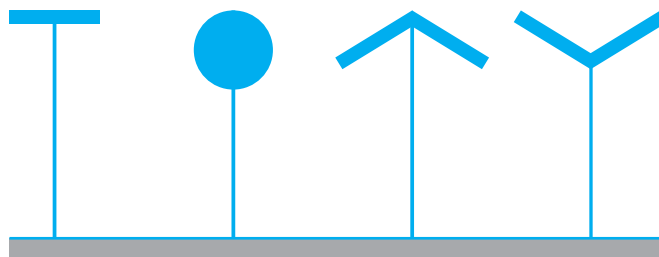
Takšna nagnjenost je v glavnem opravičljiva v primeru občutljivih objektov, ki bi se nahajali na nasprotni strani ceste, s ciljem zmanjšanja učinka zvočnih odbojev proti njim. Vendar je tovrstna nagnjenost pregrad pri nas opazna tudi na odsekih, kjer na nasprotni strani ceste ni nobenih objektov. To pa še dodatno zniža njihovo učinkovitost in podraži stroške, saj zaradi navornih učinkov takšne pregrade potrebujejo močnejše temelje in dodatno nepotrebno pozidavo terena.

Slabo učinkovitost naših pregrad skušajo projektanti in izvajalci enostavno nadomestiti s povečevanjem njihovih višin – tudi do višine 8 m, kar pa je seveda zelo sporno. To je namreč povezano s številnimi dodatnimi stranskimi učinki, kot so:

- » znatno povečanje stroškov temeljenja, porabe materiala in same gradnje;
- » težje in dražje vzdrževanje;
- » neracionalna poraba prostora;
- » poslabšanje življenjskih pogojev izpostavljenih stanovalcev (na primer znaten upad dnevne svetlobe v bivalnih prostorih izpostavljenih objektov);
- » pokvarjen krajinski videz.

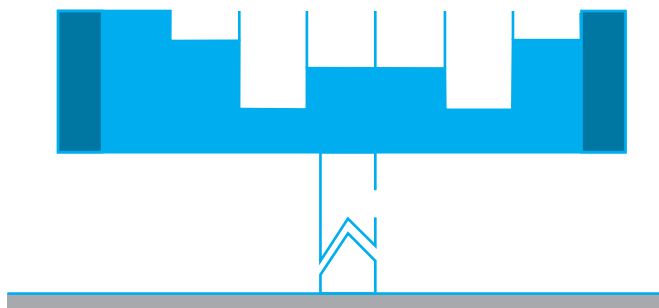
Danes se drugje po svetu v bistveno večji meri uporabljajo racionalnejše izvedbe protihrupnih pregrad. To so večinoma pregrade z uklonsko preoblikovanim vrhom oziroma protihrupne pregrade s T, Y, puščičastimi ter cilindričnimi profili (slika 2).

Na vrhu protihrupne pregrade prihaja namreč do uklona zvočnih valov, ki je tem izrazitejši, čim večja je valovna dolžina valovanja. Tovrstne vplive je možno preiskati in reševati predvsem s prijemi valovne akustike, ki pa še niso standardizirani. Vrhove pregrad je v ta namen namreč možno preoblikovati s posebnimi strešnimi zavijki. Na tej osnovi se nato izbere najprimernejši material in oblikuje po predhodno proučeni geometriji.



Slika 2: Različni tipi racionalnih pregrad, ki se uspešno uporabljajo po svetu, pri nas pa jih praktično ni

Takšne pregrade ponujajo za 2–5 dBA boljše učinke od ravnih z isto višino. Še učinkovitejše so pregrade s QRD (quadratic residue diffuser), ki dajejo za okrog 7 dBA boljše rezultate od ravnih.



Slika 3: T-QRD tip pregrade

Takšne pregrade dajejo ob skoraj enakih vloženi stroških bistveno boljše rezultate kot ravne pregrade. Žal takšnih pregrad v Sloveniji praktično ni, jih pa že kar nekaj let uspešno uporabljajo po svetu, tudi v sosednjih državah.

## DREVESNI PASOVI IN DRUGE NARAVNE DANOSTI ZA VAROVANJE PRED HRUPOM

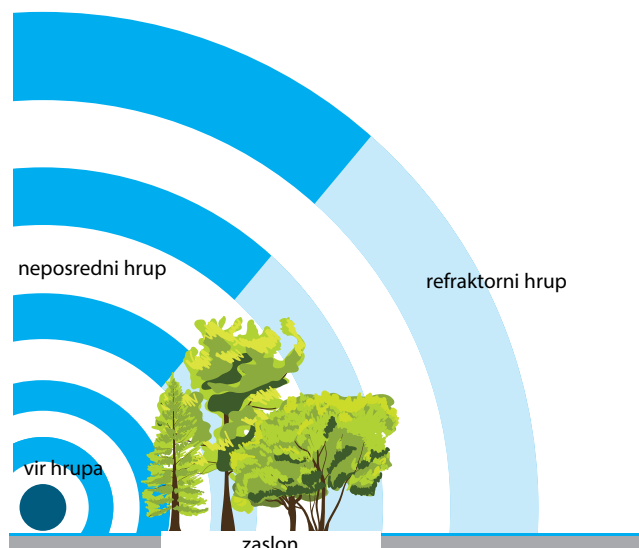
Zelo uspešen in načeloma najmanj sporen sekundarni ukrep predstavljajo gozdni pasovi. Slovenija namreč kljub opustošenju številnih gozdov v zadnjih treh letih še vedno razpolaga z možnostjo zelo uspešne, poceni in najmanj sporne rešitve prekomernega hrupa, to je sajenja in vzgajanja drevesnih pasov oziroma nasadov. 10 do 20 m pas drevja z razmiki med drevesi < 0,5 m tako zniža raven cestnega hrupa za 2–3 dBA, 120 m pas drevja z enakimi razmiki pa že za okrog 7 dBA. Dosedanje raziskave kažejo, da lahko dobimo zaznavna znižanja hrupa pri uporabi drevesnih pasov z globino najmanj 12 m, pomemben pa je tudi način razporeditve dreves v teh drevesnih pasovih.

Drevesa in gosti rastlinski pasovi lahko na splošno pozitivno vplivajo na zmanjšanje hrupa tako v objektivnem smislu kot tudi preko subjektivnega odziva na spremembe, povzročene s posaditvijo. Fizikalni mehanizmi, ki so odgovorni za takšno znižanje hrupa, so predvsem odboj, uklon, sipanje ter absorpcija zvočne energije. Nekatere rastlinske vrste so glede tovrstnega zmanjševanja učinkovitejše od drugih. Zvočna upornost (impedanca) pri prehodu zvoka skozi

# Drevesa in gosti rastlinski pasovi pozitivno vplivajo na zmanjšanje hrupa!

drevesa, rastlinske pasove in gozdne sestoje se odraža kot dodatno znižanje hrupa (excess attenuation). Z akustičnega stališča so glede znižanja ravni hrupa poleg geometrijskih razsežnosti pomembne predvsem naslednje značilnosti gozda: drevesna vrsta, premer debel, število dreves/enoto površine, njihova sipalna in absorpcijska površina, listna površina, površina in absorpcijske lastnosti lubja, krošenj in gozdnih tal. Zvočnemu valu s frekvenco 1 kHz odgovarja valovna dolžina, ki je primerljiva s premerom debela odraslega drevesa, to je dobrih 30 cm. Debla, veje in listje delno sipajo vpadlo akustično energijo. Zvok oziroma hrup, ki se sipa na vegetacijskem pasu in podobnih ovirah, se lahko v znatni meri zmanjša z nadaljnji odboji in še zlasti z absorpcijo. Z učinkovitim načrtovanjem tovrstnih pasov lahko na ta način v znatni meri vplivamo na znižanje ravni hrupa v okolju.

Preprosta ocena valovne dolžine zvočnega vala s frekvenco 1.000 Hz torej pokaže, da je takšna valovna dolžina primerljiva s premeri odraslih dreves. Vpadli zvočni valovi se deloma odbijejo in deloma uklanjajo, kar ustvari tipičen pojav sipanja zvočnih valov. Pri nizkih frekvencah se zvok izza debel uklanja, kar seveda ne prispeva k zmanjšanju hrupa. Pri visokih frekvencah pa se ta zvok odbije in deblo deluje nanj kot protihrupna ovira. Pri srednjih frekvencah je pomembno predvsem večkratno sipanje med drevesnimi debli, pri vsakem novem vpadu na drevesno strukturo se je del tudi absorbira. Na ta način se zvočna energija postopoma zmanjšuje zaradi absorpcije, tisti del, ki pa kljub temu prispe do občutljivega mesta, pa opravi daljšo pot in njegova jakost oslabi. Veje in listje oslabijo vpadlo akustično energijo, posledično se na nasprotni strani pojavijo območja senc (slika 4).



Slika 4: Shematični prikaz slike zvočnega polja v prisotnosti drevesnega pasu

Krošnje listopadnih dreves tako zmanjšujejo energijo vpadnega hrupa. Rastline in drevesa na splošno oslabijo zvok z odboji in absorpcijo energije v viskozni in termični mejni plasti blizu površja tal ali rastlin, večkrat pa pride do izraza tudi notranje dušenje zvoka zaradi vibracij listja, vej ali stebel.

Učinkovitost sipanja je odvisna od geometrije posameznih delov dreves (debla, veje, listi). Večje ko so njihove dimenzije, nižja je frekvenca, pri kateri je sipanje učinkovito. Učinkovitost sipanja se povečuje s frekvenco, prenosne poti pa postajajo pri tem bolj kompleksne, kar pogojuje stopnjo absorpcije zvočne energije. Pri nizkih frekvencah ta fenomen v znatni meri izostane, ker je valovna dolžina v primerjavi s premerom debela in vej velika in se akustična energija z lahkoto prenaša skozi. V fizikalnem smislu se lahko širjenje zvoka v prisotnosti velikega števila sipalnih ovir (zlasti debela dreves) v prvem približku obravnava kot klasični difuzijski problem, če je globina drevesnega pasu velika in absorpcija relativno nizka.

Atmosferska absorpcija, tla, drevesni pasovi, veter in temperaturni gradient vplivajo na amplitudo in spektralno obliko hrupa, ki se razširja od izvira do sprejemnika po določeni poti. Glede na naravo tal (trda ali mehka) odbojni valovi interferirajo z vpadnimi, kar povzroča oslabitve ali ojačanja zvoka kot valovanja. Pri tem namreč prihaja do destruktivne interference med neposrednim in odbitim prispevkom zvočnega vala. Drevesni pas pri tem deluje kot protihrupna ovira.

Dejavniki, ki pozitivno vplivajo na učinkovitost gozdnih sestojev na oslabitev hrupa, so predvsem: višja gostota posaditve, mešane vrste dreves in čim večja količina listov. Primerjava meritev hrupa v poletnem in zimskem obdobju za listopadna drevesa na primer pokaže pri tem jasno zaznavne razlike, tako da predstavlja učinek listov pomemben faktor. V zimskem obdobju, ki je povezano z odsotnostjo listov, je oslabitveni učinek na splošno znatno nižji.

Maksimum oslabitev se običajno nahaja pri frekvencah nekoliko nad 200 Hz, kar je pripisati učinku tal. Za višje frekvence, nad 1.000 Hz, se oslabitve v primeru gozdnih pasov postopno povečujejo, kar lahko pripišemo predvsem deblom in listju.

Splošne ugotovitve kažejo, da širokolistnato drevje zmanjšuje hrup učinkoviteje od iglavcev. Zmanjšanje hrupa je močnejše, ko se listje razteza vse do tal, kot na primer velja pri mladih drevesnih sestojih ali v primeru prisotnosti podrasti. Za doseganje dobre oslabitve hrupa je pomembno, da se ohrani gostota listje vse do bližine tal, na primer s pogostejšim pogozdovanjem mladih dreves in vzdrževanjem. Kot primerne drevesne vrste so se v ta namen pokazale na primer piramidne ciprese, tuya, evkaliptus in hrast. Izbiro drevesnih vrst je potrebno natančneje proučiti od primera do primera, glede na njihovo avtohtonost, mikroklimatske in pedološke pogoje, pa tudi prednosti in morebitne stranske učinke, ki jih lahko povzročijo izbira posameznih drevesnih vrst.

Pomembno je razlikovati med učinkom individualnega drevesa, skupine dreves in gozdnega sestoja. Zvočni odziv skupine dreves pa je v prvi vrsti povezan z učinkom tal. Impedanca tal, nad katerimi se zvok razširja, vpliva na oslabitveno stopnjo predvsem v frekvenčnem območju med 250 in 500 Hz. Sipanje zaradi vej in absorpcija v lubju ter listju pa so značilni predvsem za višje frekvence, nad 1 kHz.

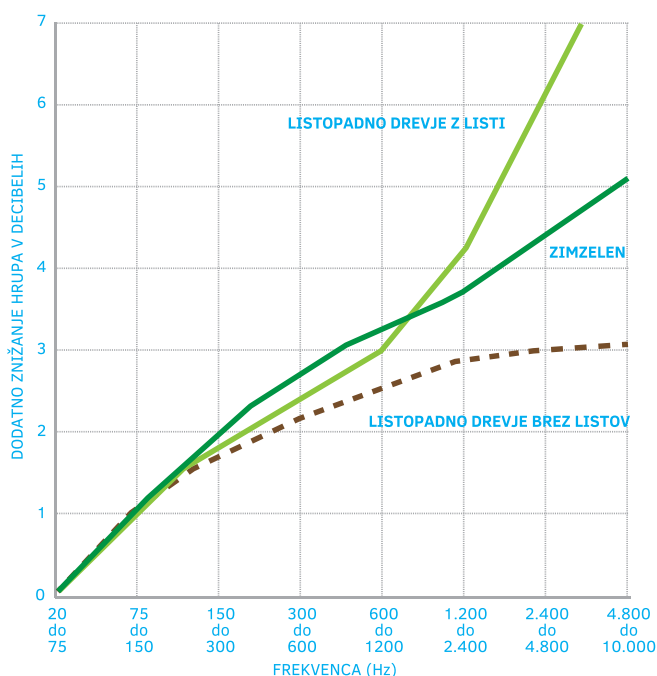
Zvočni valovi prenašajo mehansko energijo po zraku. Ta je sicer na splošno šibka, vendar vzbuja nihanje v sistemih, na katere vpada. Takšen sistem potem zaniha z določeno vibracijsko hitrostjo. Vibracijske hitrosti listov so običajno za 1 do 3 velikostne rede manjše kot vibracijske hitrosti zračnih delcev ( $5 \times 10^{-3}$  m/s). Listi se namreč obnašajo kot ploščice z različnimi načini vzbujenih vibracij. Le del zvočne energije, ki doseže liste, namreč povzroča tudi izsevanje energije z vibracijami, večina se odbije in uklanja. Kadar je absorpcija zvočne energije najpomembnejši oslabitveni faktor, je oslabitev zaradi dodatnega učinka vegetacije približno premosorazmerna z dolžino poti in gostoto listja.

V naprednejših državah predstavlja gozdarstvo za namene varovanja okolja (vključno z varstvom pred hrupom) sintezo politike, načrtovanja, krajinske arhitekture in okoljskih znanosti. Mešano sajenje različnih vrst dreves, ki ima večje količine listov, lahko izboljša učinkovitost gozdnih sestojev za oslabitev hrupa. Zato je pri podrobnejšem načrtovanju gozdnih pasov smiselno sodelovanje akustikov in gozdarjev s ciljem kreiranja novega ekosistema, ki bo znižal ravni hrupa, na primer prometnega, v občutljivih smereh na najnižjo možno mero. Zaradi posrednega vpliva na živalske vrste pa je pomembno tudi sodelovanje bioloških strokovnjakov.

### Značilnosti oslabitvenih lastnosti dreves in vegetacije v zvezi z dodatnim zniževanjem hrupa

Oslabitvene lastnosti dreves in vegetacije pri razširjanju hrupa imajo glavno osnovo v svoji sposobnosti za absorpcijo in sipanje zvočnih valov. Vpadla zvočna energija se delno absorbira v listju rastlin oziroma njihovih iglicah, vejicah, vejah, medtem ko imajo gostota listje in težje veje

pomembnejšo vlogo pri sipanju zvoka. Na ta način delujejo drevesa in vegetacijski pasovi kot polprepustne ovire, ki tako absorbirajo, kot tudi odbijajo zvok stran od sprejemnika oziroma od za hrup občutljivega mesta. Skupne oslabitvene zmoglosti drevesnih pasov pri razširjanju hrupa so v prvi vrsti odvisne od debeline gozdnega pasu, višine in splošne gostote zasejanosti tega pasu, v manjši meri pa še od velikosti in oblike listja ter značilnosti vej. Učinek difuzije je pri listih na splošno bolj dominanten kot pa učinek absorpcije. Absorpcija v listih pa postane učinkovitejša pri naraščajoči frekvenci hrupa. Poskusi so pokazali, da je določeno listje bolj učinkovito v višjih frekvenčnih območjih kot v srednjih in nizkih in da se nadalje ta učinkovitost povečuje z gostoto listja, njegovo širino in debelino. Na primer, raven hrupa s prevladujočo frekvenco okrog 4.000 Hz se zniža za približno 7 decibelov pri prehodu 30 m debelega gozdnega pasu z gostim listjem. Po drugi strani pa dobimo v območju okrog 1.000 Hz znižanje le še za približno 4 decibele pod podobnimi pogoji. Ta pojav je prikazan na sliki 5, ki primerja oslabitve hrupa različnih drevesnih vrst, ko se frekvenca hrupa povečuje.



Slika 5: Oslabitev hrupa pri prehodu gozdnega pasu različnih listavcev pri različnih frekvencah

### Absorpcija tal

Zelo pomembno vlogo pri zniževanju hrupa igra absorpcija oziroma odbojnost tal, katere merilo je impedanca oziroma pretočna upornost. Merilo za absorpcijo v tleh je pretočna upornost, to je razmerje med tlačnim gradientom in hitrostjo zraka. Izredno majhno pretočno upornost ima na primer sveže zapadla snežna odeja. Od tod izvirajo splošno znane dušilne lastnosti hrupa takšne snežne odeje, bistveno manj znano pa je, da imajo podobno lastnost tudi z vegetacijo zrahljana gozdnata oziroma humusna tla. Travnata tla imajo že desetkrat, stlačena zemlja približno stokrat in betonska tla več kot tisočkrat večjo pretočno upornost; s tem pa seveda posledično upadajo tudi dušilne lastnosti za hrup pri tovrstnih podlagah (tabela 1).

Tabela 1: Pretočne upornosti različnih materialov

Vrsta talne površine	Pretočna upornost (Pasm <sup>-2</sup> )
Suh sveže zapadel sneg debeline 0,1 m	$10^4 - 3 \times 10^4$
Rahlo uležan sneg	$2,5 \times 10^4 - 5 \times 10^4$
Gozdni humus	$2 \times 10^4 - 8 \times 10^4$
Travnate in grobo pašnate površine	$1,5 \times 10^5 - 3 \times 10^5$
Peščena tla	$8 \times 10^5 - 2,5 \times 10^6$
Stlačena zemlja	$4 \times 10^6 - 8 \times 10^6$
Makadam, močno stlačen z vozili	$5 \times 10^6 - 2 \times 10^7$
Obrabljen asfalt	$3 \times 10^7$

Tudi trdota tal in tekstura površine, preko katere prehaja zvok, imata pomembno vlogo pri oslabitvi hrupa. To je v prvi vrsti povezano z absorpcijo kakovostno mehke, grobe površine, v nasprotju s trdo, ravno površino, ki se najpogosteje obnaša kot odbojna. Tako lahko na primer trave, nizko grmičevje in zasaditve, rastlinske odeje in obdelana zemlja same po sebi ali v povezavi z drevesi ali drugimi naravnimi ali umetnimi ovirami prispevajo k zmanjšanju hrupa. Slika 6 prikazuje variabilnost oslabitvenih razmer glede hrupa nad vrsto različnih površin. Slika kaže, da se poploščeno področje v glavnem obnaša kot dober reflektor hrupa (akustično zrcalo) in da prisotnost dreves, grmičevja, trave na teh območjih lahko pozitivno prispeva k oslabitvi hrupa.

Drevje in grmovje znižata raven hrupa predvsem pri visokih frekvencah, medtem ko lahko zmanjšanje hrupa nizkih frekvenc pripišemo predvsem tlom. Tla, zrahljana z drevesnimi koreninami, imajo zelo dobre zvočno absorpcijske lastnosti. Tudi sicer so za glavno znižanje hrupa odgovorna tla, še zlasti v kolikor so prepuščena predvsem naravnim procesom. V ta namen seveda ni priporočljivo grabljenje oziroma odstranjevanje listja, saj naravni procesi na ta način, poleg ustvarjanja humusa (ki je po svojih absorpcijskih lastnostih skoraj primerljiv s snegom), tudi varujejo in ohranjajo s koreninami zrahljano zemlino, ki bi se sicer izsuševala, otrdela in s tem izgubila svoje absorpcijske lastnosti. Tako lahko že vpliv z vegetacijo zrahljanih tal prinese pomembno znižanje imisijskih ravni hrupa.

Iz navedenih dejstev lahko zaključimo, da lahko povečamo absorpcijo tal in s tem poskrbimo za dodatno znižanje hrupa tudi izven sestoja gozdnih površin.

### Debelina pasu in višina dreves

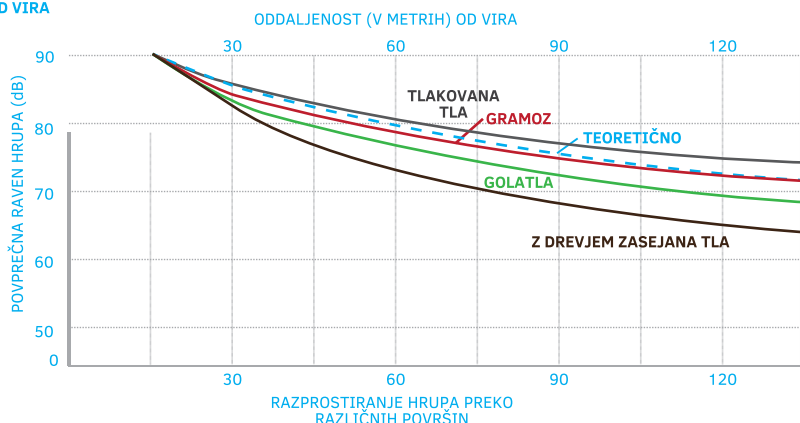
Oslabitev hrupa za optimalno izbran pas drevja lahko pri dobrem načrtovanju doseže okrog 5 dBA pri 30 m debelini pasu v frekvenčnem območju hrupa 200–8.000 Hz. Največji učinek dobimo po prvih 15 m debeline pasu. Pasovi z manj kot 15 m debelino pa so pogosto neučinkoviti. Oslabitvene vrednosti so namreč v nelinearni povezavi s debelino pasu.

Za protihrupno zaščito se kot najprimernejši pokažejo drevesni pasovi s srednjo višino 10 do 12 m. Do te višine se namreč protihrupni učinki večajo, nato pa se zmanjšujejo. Vzrok za to je predvsem staranje, odmiranje in odpadanje vejevja ob tleh, čemur so določene vrste še posebej podvržene (na primer pinije). V praksi je zato v takšnih primerih obstoj višjih dreves smiselno dopolnjevati s sajenjem grmičevja in manjšega drevja, ki zapolni takšne luknje. Največ škode pa bi v takšnih primerih seveda storili s t. i. »čiščenjem« grmičevja ter obrezovanjem vejevja na spodnjih delih drevja, kar se pri nas na žalost v praksi vse pre pogosto izvaja.

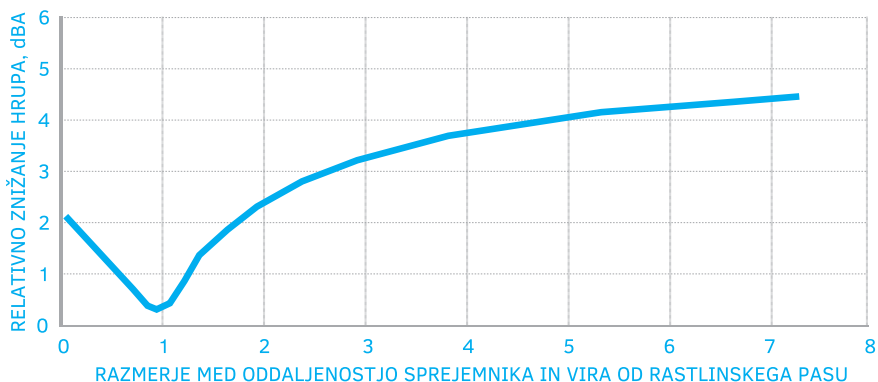
### Lega gozdnega oziroma vegetacijskega pasu kot zaslona

Zmanjšanje hrupa v gozdnem pasu je nadalje odvisno od oddaljenosti od hrupnega vira. Relativni položaj vira hrupa, gozdnega oziroma vegetacijskega pasu in za hrup občutljive lokacije je kritičnega pomena pri določanju njegove učinkovitosti glede zmanjševanja nezaželenega hrupa. Absorpcija zvoka in difuzijske karakteristike vegetacijskega pasu in s tem povezano znižanje hrupa so močno odvisni od tega, kako blizu sta vir oziroma za hrup občutljivi objekt glede na ta pas. Ta odvisnost je prikazana na sliki 7. Krivulja na grafu izrazito pade pri razmerju S/V (razmerje med oddaljenostjo sprejemnika in vira proti vegetacijskemu pasu), ko je to enako ena. To ustreza umestitvi pasu na sredino med virom hrupa in občutljivim mestom in kaže na najnižjo možno oslabitev oziroma neučinkovito namestitve vegetacijskega pasu. Oslabitev pa se povečuje, ko se razmerje S/V povečuje, kar kaže, da bližje ko je vir hrupa drevesnemu pasu, tem večjo učinkovitost ta zagotavlja. Zgornji prelom krivulje pri nizkih vrednostih S/V, ki ustreza namestitvi vegetacijskega pasu v bližini varovanega območja, pa sicer kaže na nekatere ugodnosti, vendar ne tolikšne, kot v primeru pasu, ki je nameščen v bližini vira hrupa.

REFERENČNA  
RAVEN HRUPA NA  
ODDALJENOSTI 15m  
OD VIRA



Slika 6: Že vpliv z vegetacijo zrahljanih tal prinese občutno znižanje hrupa



Slika 7: Odvisnost učinkovitosti nasada od razmerja njegove oddaljenosti do vira oz. sprejemnika

### Izbira drevesnih vrst

Pri izbiri primernih drevesnih vrst za namene znižanja hrupa je poleg akustičnega svetovalca priporočljivo tudi sodelovanje gozdarskega strokovnjaka ter ornitologa, ki naj upoštevatata ostale (neakustične) dejavnike (npr. avtohtonost in primernost posameznih drevesnih vrst, značilnosti in primernost tal, populacijo živali, vezanih na te drevesne vrste, in njihove navade itd). Z akustičnega (protihrupnega) stališča pa so na splošno priporočljive drevesne vrste z velikimi, grobimi listi, ker so te bolj učinkovite pri sipanju zvoka nizkih frekvenc. Po drugi strani pa se vrste z majhnimi listi in z gosto, drobno teksturo listja izkažejo kot uspešnejše pri sipanju zvoka visokih frekvenc. Z listopadnim drevjem z obilo listja dosežemo učinkovitejšo absorpcijo in sipanje pri višjih in visokih frekvencah kot pa v primeru zimzelenih dreves. Slika 5 prikazuje primerjavo oslabitvenih lastnosti pri razširjanju hrupa med listopadnimi in zimzelenimi drevesi v različnih frekvenčnih območjih. Kot prikazuje navedeni grafikon, listopadno drevje izgubi svojo učinkovitost, ko odpade listje. Tako so z dolgoročnega stališča iglavci in širokolistnato drevje primernejši in učinkovitejši glede zmanjševanja hrupa.

### Načini zasajevanja

Čeprav pasovi drevja in živih meja občutno povečajo estetske vrednosti okolja in psihološke koristi pri zaslanjanju hrupnih dejavnosti, pa je njihova akustična vrednost lahko precej omejena, če ni primerno načrtovana. V prvi vrsti je namreč pomembno, da je sajenje drevja opravljeno dovolj na gosto in da ima debelino najmanj 15–30 m. Če pa želimo zagotoviti dolgoročno učinkovito znižanje hrupa, tako v zimskih kot tudi v poletnih mesecih, je priporočljiva uporaba kombinacije tako listopadnega kot tudi zimzelenega drevja. V hladnejšem podnebju je priporočljiv večji delež zimzelenega drevja, še zlasti v kolikor smo omejeni tudi z razpoložljivo širino gozdnega pasu. S cikcakasto razporeditvijo dreves in grmičevja pa se v določeni meri lahko izognemo tudi vplivom odprtih oziroma kanalov, skozi katere bi se lahko hrup prosto razširjal. Gosto grmičevje, posejano pod drevesnimi krošnjami, pa zagotavlja znižanje tudi tistega deleža hrupa, ki bi se sicer tam prosto prenašal. Takšno grmičevje ni potrebno na celotnem območju drevesnega pasu, ampak je lahko zasajeno v enem ali dveh pasovih s širino okrog 6 m na približno vsakih 30 m globine drevja. Z oslabitvenega vidika mora biti vegetacijski pas nameščen čim bližje viru hrupa, če pa to ni možno, pa vsaj blizu varovanim objektom.

### Atmosferski gradienti

Atmosferski gradient hitrosti vetra, temperature in v manjši meri vlažnosti zraka imajo učinek na prenos zvoka in s tem na zmanjšanje hrupa. Ti pojavi oziroma njihovi učinki so na kratko opisani spodaj.

**Hitrost vetra.** Zvočni valovi se pri spremembi gostote zraka lomijo navzgor ali navzdol, kar ima za posledico spremembe v normalni hitrosti razširjanja zvoka na različnih višinah. Razširjanje hrupa vzdolž vetra je tako povezano s pozitivnim gradientom hitrosti (hitrost vetra na splošno narašča z višino), s tem pa se zvočni valovi upogibajo navzdol, kar povečuje hrupnost v bližini tal ter ohranja slišnost hrupnega vira na precejšnje oddaljenosti. Po drugi strani je razširjanje hrupa v obratni smeri proti vetru povezano z negativnim gradientom hitrosti, kar upogne zvočne valove navzgor, hrupnost pa se povečuje v smeri navzgor oziroma se zmanjša slišnost hrupnega vira v bližini tal. Drevesni pasovi pa lahko spremenijo vetrni vzorec.

**Temperatura.** Podobna situacija obstaja tudi v povezavi s temperaturnimi gradienti. V zgodnjih jutranjih urah in zvečer, ko se ohladi pri tleh, je običajno prisoten pozitiven temperaturni gradient (temperatura narašča z nadmorsko višino), medtem ko so negativni temperaturni gradienti značilni okrog poldneva, ko zemlja že segreje. Poleti lahko pas hladnega zraka visoke gostote nudi v pasu dreves povečan upor za razširjanje hrupa.

**Vlažnost.** Rahle razlike v vlažnosti imajo zelo majhen vpliv na razširjanje hrupa. Izredno visoka vlažnost, na primer med deževjem ali v megli, pa omogoča nastanek bolj homogene atmosfere, kar lahko pripomore k razširjanju hrupa. Na splošno pa vlažnost nima pomembnejšega učinka na zmanjšanje hrupa.

### PROTIHRUPNI NASIPI

Učinkovitejši in cenejši kot protihrupne pregrade so tudi zemeljski nasipi, idealna je njihova kombinacija z drevesnimi nasadi (slika 8).



Slika 8: Obrasel zemeljski nasip



## DRUGE UGODNOSTI DREVESNIH PASOV

### Protivetrne ugodnosti drevesnih nasadov

Že prej omenjeni cenejši in ekološko najsprejemljivejši drevesni pasovi pa ponujajo tudi zelo dobro protivetrno zaščito. Širok drevesni pas predstavlja pomembno protivetrno oviro in lahko zniža hitrost vetra za dva do štirikrat na oddaljenosti do nekaj sto metrov.



Slika 9: Drevesni nasad kot protivetrna zaščita

Znano je na primer, da je vipavska avtocesta pogosto zaprta zaradi močne burje. Eden glavnih razlogov za njeno moč ob avtocesti je izredno majhna pogozdenost tega območja. Dobro načrtovan drevesni pas bi sicer lahko znižil hitrost vetra za dva do štirikrat. Drugemu podobnemu drastičnemu primeru, povezanim z burjo, smo bili priča pred tremi leti, ko je prišlo do največjega naleta vozil pri nas, ki je zahteval tudi smrtne žrtve. Ta neljubi dogodek, ki se je zgodil na postojnski avtocesti, je imel vzrok v močnih naletih burje skupaj s snežnimi nanosi in to seveda na povsem golem, izsekanem območju ob avtocesti.

### Preprečevanje škodljivih učinkov bleščanja

Bleščanje predvsem ob nizkem soncu (po sončnem vzhodu, pred sončnim zahodom, nizko zimsko sonce) predstavlja velik problem ob prometnicah in je botrovalo že marsikateri hujši prometni nezgodi. Še zlasti to velja za odprte ceste, brez oziroma s slabo drevesno zaščito ob njihovih robovih. V izjemnih primerih je lahko bleščanje tako močno, da povsem onemogoči zaznavanja predmetov v smeri vožnje ter drugih značilnosti, pomembnih za varno vožnjo (slika 10). Precej takšnih nevarnih primerov je opaznih tudi na naših avtocestah in drugih pomembnejših prometnicah.



Slika 10: Bleščanje ob nizkem soncu lahko povsem onemogoči varno vožnjo

## Zemeljski nasipi imajo številne prednosti pred protihrupnimi pregradami:

- » imajo naraven izgled;
- » dajejo občutek odprte pokrajine;
- » ne zahtevajo dodatnih varnostnih elementov;
- » gradbeni in vzdrževalni stroški so neprimerno nižji;
- » njihova življenjska doba je praktično neomejena.

Takšni primeri so po drugi strani zelo redki ob cestah s širokimi in visokimi vegetacijskimi pasovi.

### Neugodne mikroklimatske razmere ob poletnih zastojih

Še zlasti v času turistične sezone smo priča pogostim dolgim zastojem vozil na avtocestah, pa tudi drugih prometnicah. Vozniki, ujeti v pregreti pločevini, v takšnih situacijah pogosto iščejo senco, ki pa jo zaradi izsekavanja dreves upravljalcev ceste le težko najdejo.



Slika 11: Poletni zastoji na avtocestah

Klimatske naprave, ki jih pri tem uporabljajo, predstavljajo le izhod v sili s številnimi stranskimi učinki, kot so obraba vozil, dodatno onesnaževanje zraka, poraba goriva itd.

### Izvajanje protihrupnih ukrepov ob naših prometnicah v naši praksi

Vprašanje je, ali smo se iz takšnih primerov slabe prakse česa naučili. Očitno ničesar, saj upravljalci cest nadaljujejo z razširjanjem golosekov ob avtocestah in drugih prometnicah. Tipični primer je dobesedno in neselektivno mletje oziroma uničevanje vse vegetacije od grmičevja do stoletnih smrek ob avtocestah in drugih prometnicah (slika 12; naslednja stran).



Slika 12: Golosek ob primorski avtocesti

S tem so po nepotrebem povečali tudi obremenitev številnih stanovanjskih objektov s hrupom ob avtocesti (slika 13).



Slika 13: Stanovanjski objekti ob naši avtocesti, ki so po goloseku postali nezavarovani

## ZAKLJUČEK

Prispevek prikazuje nekatere najpomembnejše vire hrupa v okolju in načine uspešnega zniževanja njihovega vpliva v okolju. Poseben poudarek je na najbolj pogostem in problematičnem viru hrupa, cestnem prometu.

V prispevku je prikazana prepogosta praksa uporabe protihrupnih pregrad ob naših avtocestah in drugih pomembnejših prometnicah. Pa še te imajo pogosto neprimerno geometrijo, kar še dodatno povečuje stroške, njihovo slabšo učinkovitost in druge negativne učinke.

Bistveno premajhen poudarek pri izvajanju protihrupnih ukrepov pa dajejo upravljavci naših pomembnejših prometnic naravnim oziroma ekološkim pristopom, kot so zemeljski nasipi, gosti drevesni nasadi in njihove kombinacije. Tovrsten pristop nudi še dodatne pomembne ugodnosti, kot so protivetrna zaščita, zmanjšanje bleščanja, ugodnejše mikroklimatske razmere za voznike, zlasti ob zastojih. Večino tovrstnih ugodnosti je po drugi strani mogoče doseči tudi ob manjših stroških. Pri zastavljenem znižanju hrupa je namreč postavitve drevesnih pasov cenejša od umetnih pregrad, predstavlja dolgotrajno rešitev in je okoljsko sprejemljivejša.

Ekološki pristop protihrupnih ukrepov – zemeljski nasipi in gosti drevesni nasadi – cenejša rešitev zmanjševanja hrupa, ki predstavlja dolgotrajno rešitev, ki je okoljsko bolj sprejemljiva.

## LITERATURA

- Akustika – SIST ISO 9613-2, Slabljenje zvoka pri širjenju na prostem - 2. del: Splošna računsko metoda, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009
- Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Ur. list RS št. 105/2005, 34/2008, 109/2009 in 62/2010)
- F. Deželak: Calculation of additional Dimensions of Noise Barriers with insufficient Noise Reduction, Internoise 96 Proc, Liverpool 1996
- ZVD: Meritve in ocena elementov protihrupne zaščite ob cestni povezavi Karlovac-Mostanje; RAI Rijeka, 2003
- ZVD: Izdelava študije vpliva gozdnega pasu na zaslanjanje hrupa med Šenčurjem in Letališčem Jožeta Pučnika, Ljubljana 2009
- VDI 2714: Schallausbreitung im Freien, Januar 1988.
- Randall F. Barron, "Industrial Noise Control and Acoustics"; Marcel Dekker, Inc., New York 2003.
- T. Okubo, K. Yamamoto: Procedures for determining the acoustic efficiency of edge-modified noise barriers; Applied Acoustics, Vol. 68, July 2007
- F. Fahy, J. Walker: Fundamentals of Noise and Vibration, E & FN Spon, 1998
- J. Kragh: Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes, Danish Acoustical Laboratory Report no. 31, 1982
- K. Attenborough, S. Taherzadeh: Sound Propagation through Forests and Tree Belts, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol.38, 2016
- M. Dobson, J. Ryan: Trees & Shrubs for Noise Control, Arboricultural advisory and Information Service, 2000
- V. Bucur, Urban Forest Acoustics, INRA, Centre de Recherches Forestières de Nancy, Tecni Acustica 2005
- T. V. Renterghem, Guidelines for optimizing road traffic noise shielding by non-deeptree belts, Ecological Engineering 69, 2014
- T. Samara, T. Tsitsoni, The effects of vegetation on reducing traffic noise from a city ring road
- Noise Control Engineering Journal. 59 (1), Jan-Feb 2011
- L. M. Iversen, J. Kagh, Acoustic ageing rates for pavements estimated by means of regression analysis, Danish Road Directorate, 2015

**Upravljalci naših pomembnejših prometnic pri izvajanju protihrupnih ukrepov dajejo bistveno premajhen poudarek naravnim oziroma ekološkim pristopom, kot so zemeljski nasipi, gosti drevesni nasadi in njihove kombinacije.**