

# EVALUATION OF NOISE ATTENUATION OF BARRIERS WITH GREENERY IN THE CZECH REPUBLIC

## HODNOCENÍ ÚTLUMU HLUČNOSTI BARIÉR SE ZELENÍ V ČESKÉ REPUBLICE

Petra Marková, Vítězslav Křivánek, Blanka Hablovičová, Jindřich Frič

CDV – Transport Research Centre, Brno, Czech Republic, [petra.markova@cdv.cz](mailto:petra.markova@cdv.cz), [vitezslav.krivanek@cdv.cz](mailto:vitezslav.krivanek@cdv.cz), [blanka.hablovicova@cdv.cz](mailto:blanka.hablovicova@cdv.cz), [jindrich.fric@cdv.cz](mailto:jindrich.fric@cdv.cz)

**Abstract:** The article is focused on the measurements of different types of “environmental” built noise barriers (semi-vegetation, green belt, barriers with vegetation) which were measured in the different places in the Czech Republic. In situ measuring was carried out in accordance with the standard ISO 1996. Short-term synchronous measurements were carried out in front of and behind the noise barrier and the effectiveness of noise barriers was determined. The measurement results show a slight increase in acute attenuation in anti-noise elements using vegetation. During the growing season, when greening occurs, a more pronounced acoustic attenuation compared to dormancy has been clearly demonstrated. This research was supported by the Ministry of Transport of the Czech Republic.

**Keywords:** noise barriers, vegetation, green belt, measurements, acoustic characteristics, acoustic attenuation

**DOI:** 10.36336/akustika2021408

### 1. INTRODUCTION

Noise is generally defined as unwanted and undesirable sound. One of the biggest sources of noise is traffic on roads and railways. The human body has almost no defences against sound signals and excessive noise exposure increases the risk of cardiovascular disease in the general population [1]. According to ETC/ACM, 232 million Europeans (about 45 % of the European population) are exposed to road noise above 55 dB during the day, and 382 million Europeans (about 75 % of the European population) are affected by road noise above 50 dB. 153 million Europeans (around 30 % of the population) are exposed to noise levels above 50 dB at night; around 83 % of the European population (423 million) is affected to noise levels above 40 dB at night [2]. The introduction of a uniform approach to preventing and limiting the adverse effects of noise in the outdoor environment is the intention of the European Directive 2002/49/EC [3], which is also transposed into the legislative environment of the Czech Republic. One of the possible solutions to reduce the impact of traffic noise on roads and railways is the implementation of a noise barrier (NB). This is a passive measure [4] that reduces the noise already generated. The noise barrier serves to protect the residential development and the population from the adverse effects of traffic noise; its location, dimensions and characteristics are based on the results of the noise study. If there is sufficient space in the vicinity, the noise barrier can also be provided with climbing plants or directly formed by suitable greenery.

### 1. ÚVOD

Hluk je obecně definován jako nechtěný a nežádoucí zvuk. Jedním z největších zdrojů hluku je provoz na pozemních komunikacích a železničních tratích. Lidský organismus nemá proti působení zvukových signálů téměř žádné obranné funkce a nadměrná hluková expozice zvyšuje riziko kardiovaskulárních onemocnění celé populace [1]. Dle ETC/ACM je hluku z pozemních komunikací nad 55 dB vystaveno v průběhu dne 232 milionů obyvatel Evropy (cca 45 % populace Evropy), hlukem nad 50 dB je zasaženo 382 mil. obyvatel, což je cca 75 % populace Evropy. Nočnímu hluku přesahujícímu 50 dB je vystaveno 153 milionů obyvatel Evropy (cca 30 % populace), cca 83 % evropské populace (423 milionů obyvatel) je v noci zasaženo hlukem nad 40 dB [2]. Zavedení jednotného přístupu k prevenci a omezování nežádoucích účinků hluku ve venkovním prostředí je záměrem Evropské směrnice 2002/49/EC [3], která je transponována i do legislativního prostředí ČR. Jedním z možných řešení, jak snížit dopady hluku z provozu na pozemních komunikacích i železničních tratích, je realizace protihlukové bariéry. Jedná se o opatření pasivní [4], které omezuje již vzniklý hluk. Protihluková bariéra slouží pro ochranu obytné zástavby a samotného obyvatelstva před nepříznivými vlivy hluku z dopravy, její umístění, rozměry a vlastnosti vycházejí z výsledků hlukové studie. Protihluková stěna může být také, pokud je v jejím okolí dostatek prostoru, opatřena popínavými rostlinami nebo přímo tvořena vhodnou zelení.

## 2. VEGETATION AND ITS EFFECT ON NOISE REDUCTION

Vegetation has an important climatic function, regulating the microclimate, reducing temperature, increasing humidity, producing oxygen, serving as a windbreak or removing pollutants from the air. In addition, it helps to improve the hydrological conditions in its surroundings (water retention) and protects the soil against erosion, it also contributes to noise reduction, reduces dust and has a significant aesthetic function. It can not only enliven the urban environment and cover unsightly places, but also create a more pleasant atmosphere for people. Its inseparable function is therefore social, psychological and hygienic, which includes noise reduction [5]. However, its acoustic properties change depending on the season and regular maintenance is required (biomass removal, trimming, watering, etc.), the acoustic attenuation of vegetation will differ in summer and winter. Obviously, in summer the attenuation could be higher, in winter deciduous trees and shrubs lose large amounts of biomass, thus reducing the attenuation. The interaction between noise and vegetation includes direct effects such as reflection, diffraction, scattering and absorption by plant elements (stems, branches, leaves). However, the soft soil under vegetation (action of roots and humus layer) may also contribute to noise reduction [6]. Nowadays, natural materials are widely used in the construction elements of noise barrier, in which climbing plant species are planted to create a natural-looking wall. In urban environments, vegetation can be used as vertical gardens (e.g. on building facades) [7]. Low-maintenance plants are used for the greening of the noise barriers, which can only withstand natural irrigation. The use of vegetation alone as an effective means of noise reduction was described as early as 1946 [8] and has been the subject of many studies since then. All studies have shown that multiple pieces of vegetation (plants, trees or shrubs) or a combination of species are needed for "some" acoustic attenuation. One study reported [9] that maximum noise attenuation occurred where the leaf size was equal to half the wavelength of the sound. In practice, this means that it is essential that any vegetation used to reduce noise should contain a high proportion of deciduous species. Noise reduction by planting trees in strips can be ensured by their appropriate placement or by the selection of the trees themselves [10], where a better effect can be achieved, for example, by changing the arrangement of the trees themselves, where it is preferable not to plant trees in uniform crowds. If the trees are planted evenly, the belt needs to be for example extended which requires more space. However, it is enough to plant trees with thicker trunks or to plant trees randomly, see Figure 1. The best solution is a combination of grass, shrubs and trees, where the maximum number of height floors is covered [11, 12], this placement of greenery is shown schematically in Fig. 2.

## 2. VEGETACE A JEJÍ VLIV NA SNÍŽENÍ HLUKU

Vegetace má důležitou klimatickou funkci, reguluje mikroklima, snižuje teplotu, zvyšuje vlhkost ovzduší, produkuje kyslík, může sloužit jako větrolam či odstraňuje polutanty z ovzduší. Navíc pomáhá zlepšovat hydrologické poměry ve svém okolí (zadržuje vodu) a chrání půdu proti erozi, přispívá také ke snížení hluku, snižuje prašnost a nezanedbatelná je estetická funkce. Dokáže oživit nejen městské prostředí a zakrýt nevzhledná místa, ale také navodit příjemnější atmosféru pro člověka. Její neoddělitelnou funkcí je tedy funkce sociální, psychologická a hygienická, kam patří právě redukce hluku [5]. Její akustické vlastnosti se ale mění v závislosti na ročním období a je zapotřebí pravidelná údržba (odklízení biomasy, zastřihávání, zavlažování apod.), akustický útlum se bude u vegetace lišit v létě a v zimě. Je zřejmé, že v létě by mohl být útlum vyšší, v zimě ztrácí listnaté stromy i keře velké množství biomasy, čímž dochází ke snižování útlumu. Interakce mezi hlučným a vegetací zahrnuje přímé účinky, jako jsou odraz, difrakce, rozptyl a absorpce rostlinnými prvky (stonky, větve, listy). Ke snížení hluku může ale také přispívat měkká půda pod vegetací (působení kořenů a humusové vrstvy) [6]. V současné době se přírodní materiály hojně využívají v rámci konstrukčních prvků protihlukových stěn, kdy se navíc sází vegetace popínavých druhů rostlin, díky čemuž se vytvoří přírodně působící stěna. V městském prostředí lze vegetaci využít jako vertikální zahrady (např. na fasádách domů) [7]. Pro ozelenění protihlukových stěn se používají rostliny nenáročné na údržbu, které vydrží pouze s přírodním zavlažováním. Použití samotné vegetace jako účinného prostředku pro snížení hlučnosti bylo popsáno již roku 1946 [8] a od té doby bylo předmětem mnoha studií. Ze všech studií vyplynulo, že pro „nějaký“ akustický útlum je potřeba více kusů vegetace (rostlin, stromů či keřů) nebo kombinace různých druhů. V jedné ze studií se uvádí [9], že maximální zeslabení hluku nastalo tam, kde byl rozměr listu roven polovině vlnové délky zvuku. V praxi to znamená, že je nezbytné, aby každá vegetace sloužící ke snížení hluku obsahovala vysoký podíl listnatých druhů. Snížení hlučnosti vysazením stromů v pásích lze zajistit jejich vhodným umístěním či samotným výběrem stromů [10], kdy lepšího účinku lze docílit např. změnou uspořádání samotných stromů, kdy je vhodným řešením nesázet stromy do rovnoměrných zástupů. Pokud se stromy vysázejí rovnoměrně, je potřeba takový pás např. prodloužit, což vyžaduje více prostoru. Stačí ovšem jen vysázet stromy se silnějšími kmeny nebo stromy sázet náhodně, viz obrázek 1. Nejlepším řešením je kombinace travního porostu, keřů a stromů, kdy dojde k pokrytí co nejvyššího počtu výškových pater [11, 12], toto umístění zeleně je schématicky znázorněno na Obr. 2.

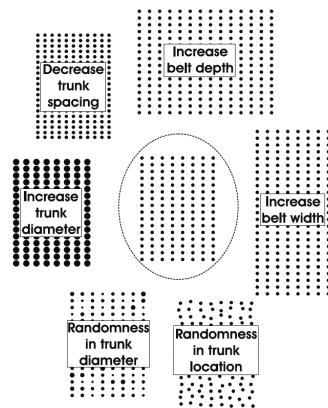
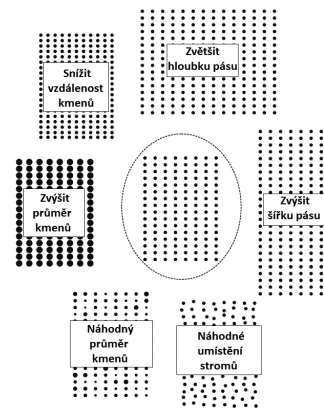


Fig. 1: Basic examples of how to improve the acoustic performance of tree belts near roads [10]



Obr. 1: Základní příklady, jak zlepšit akustickou účinnost pásů stromů poblíž silnic [10]

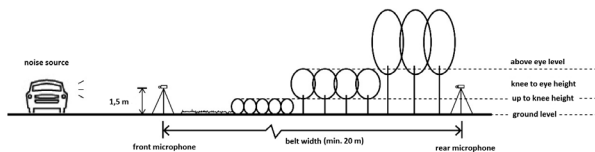
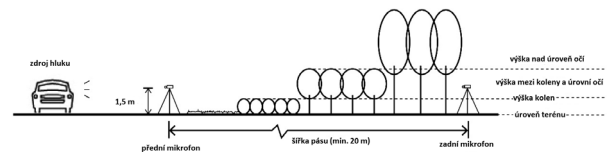


Fig. 2: Schematic representation of measurement and appropriate vegetation location for high acoustic efficiency [11]



Obr. 2: Schématické znázornění měření a vhodného umístění vegetace pro vysokou akustickou účinnost [11]

There are also some disadvantages to using vegetation as the sole means of noise mitigation. A major disadvantage is the growth of the vegetation itself, i.e. it may take many years after planting before it starts to perform its function. In addition, as the vegetation grows, it is constantly changing and thus its acoustic effectiveness changes. It is therefore impossible to define the exact attenuation that will be provided by a particular green belt and therefore it is also impossible to determine the attenuation of individual components of the green belt (i.e. one plant, one shrub, one tree, etc.). Therefore, tree belts are not planted where specific values need to be included in the calculation to assess future effectiveness. Furthermore, some maintenance is required throughout the lifetime to maintain optimal efficiency [4].

### 3. MEASUREMENT OF NOISE BARRIERS IN REAL CONDITIONS

The aim of the measurements was to determine the acoustic attenuation of the greening of the noise wall or the green belt itself. Some of the measurements were carried out within the annual cycle of alternating growth activity of the greenery and the resting period, thus the growing season phase (physiological functions of plants fully activated) and the dormancy phase (resting phase). The synchronous measurements were carried out with two microphones, two independent sound-level meters, in front of and behind the noise wall or greenery, at a height of 1.5 m above the level of contact of the noise wall with the ground and distances of 1.0 m in front of and behind NB for a duration of 1 hour at various locations in the Czech Republic in the dormancy and vegetation phase. The measurements were carried out in accordance with the ISO 1996 standard [13]. Unrelated noise events were always excluded from the measurement results. The methodology for the 2016 national traffic census was used to determine traffic intensity

Existují také určité nevýhody při použití vegetace jako jediného prostředku ke zmírnění hluku. Velkou nevýhodou je samotný růst vegetace, tj. hned po výsadbě může trvat mnoho let, než začne plnit svoji funkci. Navíc se růstem tato vegetace neustále mění a tím se mění i její akustická účinnost. Je tedy nemožné přesně definovat útlum, který bude poskytnut konkrétním pásem zeleně a tudíž nelze ani stanovit útlum jednotlivých složek zeleně (tzn. jedné rostliny, jednoho keře, jednoho stromu apod.). Proto se stromové pásy nevysazují tam, kde je potřeba k posouzení budoucí účinnosti do výpočtů dosadit konkrétní hodnoty. Dále je zapotřebí po celou dobu životnosti určitá údržba pro udržení optimální účinnosti [4].

### 3. MĚŘENÍ PHS V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH

Cílem provedených měření bylo zjistit, jaký akustický útlum má ozelenění protihlukové stěny či vlastního pásu zeleně. Ně která z měření byla realizována v rámci ročního cyklu střídání růstové aktivity zeleně a období klidu, tedy fáze vegetační sezóny (fyziologické funkce rostlin plně aktivovány) a fáze dormance (odpočinková fáze). Synchronní měření bylo prováděno dvěma mikrofony, dvěma nezávislými zvukoměry, před a za protihlukovou stěnou či zelení ve výšce 1,5 m nad úrovní kontaktu protihlukové stěny se zemí a vzdálenosti 1,0 m před a za PHS v délce náměru 1 hodina na různých místech v České republice ve fázi dormance a vegetace. Měření bylo prováděno v souladu s normou ISO 1996 [13]. Z výsledků měření vždy byly vyloučeny nesouvisející hlukové události. Pro určení intenzity dopravy byla použita metodika pro celostátní sčítání dopravy 2016 [14]. K měření bylo využito ověřených přístrojů Brüel & Kjær: zvukový analyzátor typu 2250 a 2270, mikrofony typu 4189 a kalibrátor typu 4231. Veličiny byly měřeny při ča-



[14]. Verified Brüel & Kjær instruments were used for the measurements: sound analyser type 2250 and 2270, microphones type 4189 and calibrator type 4231. The quantities were measured at the time constant FAST and frequency weight filter A. Calibration was always performed before and after the measurement. Examples of the field measurement are shown in Fig. 3 (measurement site No. 2), where the difference between dormancy and vegetation phases is evident.



Fig. 3: Examples of noise measurements at site No. 2 during dormancy (left) and vegetation (right).

The different types of environmental noise barriers that were measured are described in the following Tab. 1. It lists the main material and description of the noise barrier, the age of NB at the time of measurement, its total height at the measurement location, and the maximum permissible speed at that location at the time of measurement. The exact location of the measurement site is not given to maintain neutrality towards owners, administrators, and contractors; the authors of the article are concerned only with acoustic assessment.

| Č. | Materiál a popis                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Stáří [rok] | Výška [m]     | Rychlost [km/h] | Hodinová intenzita dopravy SV/TV |               |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|-----------------|----------------------------------|---------------|
|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |             |               |                 | Fáze dormance                    | Fáze vegetace |
| 1  | Klasická konstrukce PHS porostlá zelení, recyklovaný plast. Měření ve vzdálenosti 0,5 m a 1,5 m od komunikace. Měření ve fázi dormance i vegetace.                                                                                                                                                         | více než 10 | 4,0           | 50              | 390/0                            | 405/2         |
| 2  | Trubková konstrukce porostlá zelení a dřevnatými liánami. Rozteč trubek 0,7 m. Měření ve vzdálenosti 3,5 m a 5,0 m od komunikace. Měření ve fázi dormance i vegetace.                                                                                                                                      | 6           | 3,0           | 50              | 1 159/82                         | 974/99        |
| 3  | PHS ze 7 na sobě vrstvených vegetačních betonových bloků. Truhlíky jsou na sobě kaskádovitě navrstveny. Měření ve vzdálenosti 0,6 m a 2,0 m od komunikace. Měření ve fázi vegetace.                                                                                                                        | více než 20 | 3,0           | 70              | -                                | 503/24        |
| 4  | Travnatá plocha, synchronní měření s č. 5 ve vzdálenosti 1 m a 10 m od komunikace, měření ve fázi dormance i vegetace.                                                                                                                                                                                     | -           | -             | 80              | 1 487/60                         | 1 450/50      |
| 5  | Pás listnaté zeleně (8 m šířky), synchronní měření s č. 4 ve vzdálenosti 1 m a 10 m od komunikace, měření ve fázi dormance i vegetace.                                                                                                                                                                     | více než 10 | cca 4,0       | 80              | 1 487/60                         | 1 450/50      |
| 6  | Travnatá plocha, synchronní měření s č. 7 ve vzdálenosti 1 m, 10 m a 14 m od komunikace, měření ve fázi vegetace.                                                                                                                                                                                          | -           | -             | 50              | -                                | 658/8         |
| 7  | Travnatá plocha, synchronní měření s č. 6 ve vzdálenosti 1 m od komunikace, hustý jehličnatý porost tisů šíře 1,5 m, výšky 1,6 m, délky 6,0 m ve vzdálenosti 10 m od komunikace, náhodný jehličnatý porost borovic (v blízkosti porostu tisů), ve vzdálenosti 14 m od komunikace, měření ve fázi vegetace. | více než 10 | cca 1,6 a 4,0 | 50              | -                                | 658/8         |

Tab. 1: Description of the measured noise barriers.  
Note: AV - sum of all vehicles, HV - heavy vehicles

sové konstantě FAST a frekvenčním váhovém filtru A. Kalibrace byla vždy provedena před a po ukončení měření. Ukázka měření v terénu je znázorněna na Obr. 3 (lokalita měření č. 2), kde je patrný rozdíl mezi fází dormance a vegetace.



Obr. 3: Ukázka měření hlučnosti na lokalitě č. 2 ve fázi dormance (vlevo) a vegetace (vpravo).

Jednotlivé typy environmentálních protihlukových stěn, které byly měřeny, jsou popsány v následující Tab. 1. Je zde uveden hlavní materiál a popis protihlukové stěny, stáří protihlukové stěny v době měření, její celková výška v místě měření, maximální povolená rychlost v daném místě v době měření. Přesná lokalizace místa měření není uvedena z důvodu zachování neutrality vůči vlastníkům, správcům i zhotovitelům, autorům článku se jedná pouze o akustické posouzení.

| No. | Material and description                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Age [year]   | Height [m]       | Speed [kph] | Hourly traffic intensity AV/HV |                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------|-------------|--------------------------------|------------------|
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |                  |             | Dormant phase                  | Vegetation phase |
| 1   | Classic NB construction covered with greenery, recycled plastic. Measured at distances of 0.5 m and 1.5 m from the road. Measured in dormant and vegetation phases.                                                                                                                                               | more than 10 | 4.0              | 50          | 390/0                          | 405/2            |
| 2   | A tubular structure covered with greenery and woody lianas. Pipe spacing 0.7 m. Measured at distances of 3.5 m and 5.0 m from the road. Measured in dormant and vegetation phases.                                                                                                                                | 6            | 3.0              | 50          | 1,159/82                       | 974/99           |
| 3   | NB of 7 layered vegetated concrete blocks. The blocks are cascaded on top of each other. Measured at distances of 0.6 m and 2.0 m from the road. Measured in the vegetation phase.                                                                                                                                | more than 20 | 3.0              | 70          | -                              | 503/24           |
| 4   | Grassland, synchronous measurements with No. 5. Measured at distances of 1 m and 10 m from the road. Measured in dormant and vegetation phases.                                                                                                                                                                   | -            | -                | 80          | 1,487/60                       | 1,450/50         |
| 5   | Leafy green belt (8 m wide), synchronous measurements with No. 4. Measured at distances of 1 m and 10 m from the road. Measured in dormant and vegetation phases.                                                                                                                                                 | more than 10 | app. 4.0         | 80          | 1,487/60                       | 1,450/50         |
| 6   | Grassland, synchronous measurements with No. 7. Measured at distances of 1 m, 10 m, and 14 m from the road. Measured in the vegetation phase.                                                                                                                                                                     | -            | -                | 50          | -                              | 658/8            |
| 7   | Grassland, synchronous measurements with No. 6. Measured at 1 m from the road. Dense coniferous yew cover 1.5 m wide, height 1.6 m, length 6.0 m measured at a distance of 10 m from the road. Random coniferous pine cover (near to the yew cover) measured at 14 m from the road. Measured in vegetation phase. | more than 10 | app. 1.6 and 4.0 | 50          | -                              | 658/8            |

Tab. 1: Popis měřených protihlukových stěn.  
Poznámka: SV – součet vozidel, TV – těžká vozidla

The results of the  $L_{Aeq}$  measurements are given in Tab. 2, which shows the measured values behind and in front of the NB, at each phase of dormancy/vegetation, including a specification of the location if applicable (see Tab. 1 for a description). The last column of Tab. 2 shows the difference in  $L_{Aeq}$  between the vegetation and dormancy phases (**V** and **D**) at the same location. Thus, the positive effect of greening (like [11]) – an increase in noise attenuation behind the barrier – is clearly evident. Several very important facts can be observed from the measurement results. The difference between the measured values in front of and behind the noise barrier is not affected by the traffic intensity or its composition. When traffic intensity increases or changes in favour of freight traffic, the noise both ahead and behind the barrier will increase in approximately equal proportions. At higher traffic intensities, the noise level in front of and behind the barrier increases in approximately the same proportion. On the other hand, the height, condition of the noise barrier and its immediate surroundings are influencing parameters.

Výsledky měření  $L_{Aeq}$  udává Tab. 2, ve které jsou naměřené hodnoty za a před protihlukovou stěnou, a to v jednotlivých fázích dormance/vegetace včetně případného upřesnění umístění, kdy popis je uveden v Tab. 1. Poslední sloupec Tab. 2 uvádí pro dílčí měření rozdíl  $L_{Aeq}$  mezi fází vegetace a dormance (**V** a **D**) na tomtéž místě. Je tak jasně zřejmý pozitivní vliv ozelenění podobně jako u [11] – zvýšení útlumu hluku za bariérou. Z výsledků měření lze pozorovat několik velmi důležitých faktů. Intenzita provozu ani jeho složení neovlivňuje rozdíl mezi naměřenými hodnotami před a za protihlukovou bariérou. Při zvýšení intenzity provozu či změnou jejího složení ve prospěch nákladní dopravy se zvedne hlučnost před i za bariérou přibližně ve stejném poměru. Při vyšší intenzitě provozu se zvýšila hodnota hluku jak před, tak za bariérou, ovšem celkový rozdíl zůstal zachován. Naopak ovlivňujícím parametrem je výška, stav protihlukové bariéry a její bezprostřední okolí.

| No. | Description                                  | Sound pressure level A [dB] |             |             |             |             |             |             |            |            |             |             |            | $\Delta L_{Aeq}$<br>(V-D) |
|-----|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|
|     |                                              | $L_{Amax}$                  | $L_{Amin}$  | $L_{Cpeak}$ | $L_1$       | $L_5$       | $L_{10}$    | $L_{50}$    | $L_{90}$   | $L_{95}$   | $L_{99}$    | $L_{Aeq}$   |            |                           |
| 1   | Dormancy; in front of                        | 92.1                        | 47.9        | 104.6       | 79.1        | 76.2        | 74.5        | 63.1        | 52.6       | 51.6       | 50.4        | 69.4        |            |                           |
| 1   | Dormancy; behind                             | 70.5                        | 42.1        | 92.0        | 58.4        | 56.9        | 56.3        | 54.0        | 44.3       | 43.7       | 42.8        | 53.7        |            |                           |
| 1   | <b>Difference</b>                            | <b>21.6</b>                 | <b>5.8</b>  | <b>12.6</b> | <b>20.7</b> | <b>19.3</b> | <b>18.2</b> | <b>9.1</b>  | <b>8.3</b> | <b>7.9</b> | <b>7.6</b>  | <b>15.7</b> |            |                           |
| 1   | Vegetation; in front of                      | 90.0                        | 48.8        | 107.8       | 79.0        | 75.3        | 73.2        | 61.4        | 54.6       | 53.5       | 51.8        | 68.9        | -0.5       |                           |
| 1   | Vegetation; behind                           | 68.7                        | 44.8        | 95.0        | 58.4        | 54.9        | 53.7        | 50.5        | 47.8       | 47.1       | 46.1        | 51.4        | -2.3       |                           |
| 1   | <b>Difference</b>                            | <b>21.3</b>                 | <b>4.0</b>  | <b>12.8</b> | <b>20.6</b> | <b>20.4</b> | <b>19.5</b> | <b>10.9</b> | <b>6.8</b> | <b>6.4</b> | <b>5.7</b>  | <b>17.5</b> | <b>1.8</b> |                           |
| 2   | Dormancy; in front of                        | 97.2                        | 52.0        | 109.8       | 86.1        | 81.3        | 79.3        | 72.6        | 65.9       | 63.8       | 59.1        | 76.0        |            |                           |
| 2   | Dormancy; behind                             | 93.5                        | 51.9        | 107.0       | 83.6        | 79.0        | 77.2        | 71.2        | 63.8       | 61.2       | 56.3        | 73.9        |            |                           |
| 2   | <b>Difference</b>                            | <b>3.7</b>                  | <b>0.1</b>  | <b>2.8</b>  | <b>2.5</b>  | <b>2.3</b>  | <b>2.1</b>  | <b>1.4</b>  | <b>2.1</b> | <b>2.6</b> | <b>2.8</b>  | <b>2.1</b>  |            |                           |
| 2   | Vegetation; in front of                      | 91.7                        | 52.8        | 110.5       | 86.9        | 82.0        | 79.6        | 71.4        | 63.7       | 61.1       | 57.0        | 75.9        | -0.1       |                           |
| 2   | Vegetation; behind                           | 87.9                        | 51.3        | 106.5       | 82.8        | 78.5        | 76.2        | 69.1        | 61.7       | 58.9       | 54.4        | 72.7        | -1.2       |                           |
| 2   | <b>Difference</b>                            | <b>3.8</b>                  | <b>1.5</b>  | <b>4.0</b>  | <b>4.1</b>  | <b>3.5</b>  | <b>3.4</b>  | <b>2.3</b>  | <b>2.0</b> | <b>2.2</b> | <b>2.6</b>  | <b>3.2</b>  | <b>1.1</b> |                           |
| 3   | Vegetation; in front of                      | 95.1                        | 45.8        | 113.3       | 83.9        | 79.5        | 77.1        | 65.3        | 52.9       | 50.7       | 47.7        | 73.1        |            |                           |
| 3   | Vegetation; behind                           | 68.4                        | 37.4        | 93.2        | 61.2        | 57.2        | 55.3        | 50.0        | 45.3       | 44.1       | 42.3        | 52.0        |            |                           |
| 3   | <b>Difference</b>                            | <b>26.7</b>                 | <b>8.4</b>  | <b>20.1</b> | <b>22.7</b> | <b>22.3</b> | <b>21.8</b> | <b>15.3</b> | <b>7.6</b> | <b>6.6</b> | <b>5.4</b>  | <b>21.1</b> |            |                           |
| 4   | Dormancy; grassland in front of (1 m)        | 96.7                        | 62.0        | 110.6       | 88.6        | 85.0        | 83.7        | 77.2        | 69.3       | 67.5       | 65.1        | 79.8        |            |                           |
| 4   | Dormancy; grassland behind (10 m)            | 95.3                        | 59.0        | 106.1       | 76.5        | 74.1        | 73.1        | 70.0        | 65.5       | 64.1       | 61.9        | 70.7        |            |                           |
| 4   | <b>Difference</b>                            | <b>1.4</b>                  | <b>3.0</b>  | <b>4.5</b>  | <b>12.1</b> | <b>10.9</b> | <b>10.6</b> | <b>7.2</b>  | <b>3.8</b> | <b>3.4</b> | <b>3.2</b>  | <b>9.1</b>  |            |                           |
| 4   | Vegetation; grassland in front of (1 m)      | 97.5                        | 60.5        | 109.7       | 88.2        | 85.0        | 83.8        | 78.1        | 70.4       | 68.7       | 66.1        | 80.1        | 0.3        |                           |
| 4   | Vegetation; grassland behind (10 m)          | 79.7                        | 57.2        | 99.5        | 76.1        | 73.9        | 73.0        | 69.9        | 65.0       | 63.6       | 61.0        | 70.4        | -0.3       |                           |
| 4   | <b>Difference</b>                            | <b>17.8</b>                 | <b>3.3</b>  | <b>10.2</b> | <b>12.1</b> | <b>11.1</b> | <b>10.8</b> | <b>8.2</b>  | <b>5.4</b> | <b>5.1</b> | <b>5.1</b>  | <b>9.7</b>  | <b>0.6</b> |                           |
| 5   | Dormancy; in front of the green belt (1 m)   | 94.3                        | 59.4        | 110.1       | 89.0        | 84.7        | 83.3        | 77.3        | 68.8       | 67.2       | 64.2        | 79.7        |            |                           |
| 5   | Dormancy; behind the green belt (10 m)       | 94.7                        | 57.0        | 105.3       | 75.9        | 73.3        | 72.1        | 68.9        | 64.6       | 63.4       | 61.2        | 69.7        |            |                           |
| 5   | <b>Difference</b>                            | <b>-0.4</b>                 | <b>2.4</b>  | <b>4.8</b>  | <b>13.1</b> | <b>11.4</b> | <b>11.2</b> | <b>8.4</b>  | <b>4.2</b> | <b>3.8</b> | <b>3.0</b>  | <b>10.0</b> |            |                           |
| 5   | Vegetation; in front of the green belt (1 m) | 97.7                        | 60.2        | 110.0       | 89.6        | 85.2        | 83.6        | 77.9        | 69.6       | 67.7       | 65.2        | 80.2        | 0.5        |                           |
| 5   | Vegetation; behind the green belt (10 m)     | 79.6                        | 57.8        | 95.6        | 74.5        | 72.6        | 71.8        | 68.6        | 64.0       | 62.7       | 60.5        | 69.1        | -0.6       |                           |
| 5   | <b>Difference</b>                            | <b>18.1</b>                 | <b>2.4</b>  | <b>14.4</b> | <b>15.1</b> | <b>12.6</b> | <b>11.8</b> | <b>9.3</b>  | <b>5.6</b> | <b>5.0</b> | <b>4.7</b>  | <b>11.1</b> | <b>1.1</b> |                           |
| 6   | Vegetation; grassland (1 m)                  | 87.8                        | 42.1        | 103.2       | 77.5        | 74.6        | 72.9        | 65.0        | 54.1       | 50.8       | 45.8        | 69.0        |            |                           |
| 6   | Vegetation; grassland (10 m)                 | 77.2                        | 45.2        | 93.8        | 71.4        | 67.8        | 66.4        | 60.1        | 51.5       | 49.9       | 47.0        | 62.8        |            |                           |
| 6   | Vegetation; grassland (14 m)                 | 80.3                        | 41.7        | 94.4        | 68.0        | 64.5        | 63.2        | 57.3        | 48.9       | 47.4       | 45.4        | 59.8        |            |                           |
| 6   | <b>Difference 1-10</b>                       | <b>10.6</b>                 | <b>-3.1</b> | <b>9.4</b>  | <b>6.1</b>  | <b>6.8</b>  | <b>6.5</b>  | <b>4.9</b>  | <b>2.6</b> | <b>0.9</b> | <b>-1.2</b> | <b>6.2</b>  |            |                           |
| 6   | <b>Difference 1-14</b>                       | <b>7.5</b>                  | <b>0.4</b>  | <b>8.8</b>  | <b>9.5</b>  | <b>10.1</b> | <b>9.7</b>  | <b>7.7</b>  | <b>5.2</b> | <b>3.4</b> | <b>0.4</b>  | <b>9.2</b>  |            |                           |
| 7   | Vegetation; grassland (1 m)                  | 86.7                        | 41.7        | 105.0       | 79.6        | 75.9        | 73.5        | 64.4        | 51.2       | 48.4       | 44.2        | 69.1        |            |                           |
| 7   | Vegetation; yew cover (10 m)                 | 75.4                        | 41.7        | 94.1        | 69.8        | 65.9        | 64.6        | 58.0        | 47.9       | 46.5       | 44.4        | 60.8        |            |                           |
| 7   | Vegetation; pine cover (14 m)                | 81.6                        | 40.0        | 93.1        | 67.2        | 63.9        | 62.4        | 56.0        | 47.4       | 45.8       | 43.6        | 58.8        |            |                           |
| 7   | <b>Difference 1-10</b>                       | <b>11.3</b>                 | <b>0.0</b>  | <b>10.9</b> | <b>9.8</b>  | <b>10.0</b> | <b>8.9</b>  | <b>6.4</b>  | <b>3.3</b> | <b>1.9</b> | <b>-0.2</b> | <b>8.3</b>  |            |                           |
| 7   | <b>Difference 1-14</b>                       | <b>5.1</b>                  | <b>1.7</b>  | <b>11.9</b> | <b>12.4</b> | <b>12.0</b> | <b>11.1</b> | <b>8.4</b>  | <b>3.8</b> | <b>2.6</b> | <b>0.6</b>  | <b>10.3</b> |            |                           |

| Č. | Popis                              | Hladiny akustického tlaku A [dB] |             |             |             |             |             |             |            |            |             |             |            | $\Delta L_{Aeq}$<br>(V-D) |
|----|------------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|
|    |                                    | $L_{Amax}$                       | $L_{Amin}$  | $L_{Cpeak}$ | $L_1$       | $L_5$       | $L_{10}$    | $L_{50}$    | $L_{90}$   | $L_{95}$   | $L_{99}$    | $L_{Aeq}$   |            |                           |
| 1  | Dormance; před                     | 92,1                             | 47,9        | 104,6       | 79,1        | 76,2        | 74,5        | 63,1        | 52,6       | 51,6       | 50,4        | 69,4        |            |                           |
| 1  | Dormance; za                       | 70,5                             | 42,1        | 92,0        | 58,4        | 56,9        | 56,3        | 54,0        | 44,3       | 43,7       | 42,8        | 53,7        |            |                           |
| 1  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>21,6</b>                      | <b>5,8</b>  | <b>12,6</b> | <b>20,7</b> | <b>19,3</b> | <b>18,2</b> | <b>9,1</b>  | <b>8,3</b> | <b>7,9</b> | <b>7,6</b>  | <b>15,7</b> |            |                           |
| 1  | Vegetace; před                     | 90,0                             | 48,8        | 107,8       | 79,0        | 75,3        | 73,2        | 61,4        | 54,6       | 53,5       | 51,8        | 68,9        | -0,5       |                           |
| 1  | Vegetace; za                       | 68,7                             | 44,8        | 95,0        | 58,4        | 54,9        | 53,7        | 50,5        | 47,8       | 47,1       | 46,1        | 51,4        | -2,3       |                           |
| 1  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>21,3</b>                      | <b>4,0</b>  | <b>12,8</b> | <b>20,6</b> | <b>20,4</b> | <b>19,5</b> | <b>10,9</b> | <b>6,8</b> | <b>6,4</b> | <b>5,7</b>  | <b>17,5</b> | <b>1,8</b> |                           |
| 2  | Dormance; před                     | 97,2                             | 52,0        | 109,8       | 86,1        | 81,3        | 79,3        | 72,6        | 65,9       | 63,8       | 59,1        | 76,0        |            |                           |
| 2  | Dormance; za                       | 93,5                             | 51,9        | 107,0       | 83,6        | 79,0        | 77,2        | 71,2        | 63,8       | 61,2       | 56,3        | 73,9        |            |                           |
| 2  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>3,7</b>                       | <b>0,1</b>  | <b>2,8</b>  | <b>2,5</b>  | <b>2,3</b>  | <b>2,1</b>  | <b>1,4</b>  | <b>2,1</b> | <b>2,6</b> | <b>2,8</b>  | <b>2,1</b>  |            |                           |
| 2  | Vegetace; před                     | 91,7                             | 52,8        | 110,5       | 86,9        | 82,0        | 79,6        | 71,4        | 63,7       | 61,1       | 57,0        | 75,9        | -0,1       |                           |
| 2  | Vegetace; za                       | 87,9                             | 51,3        | 106,5       | 82,8        | 78,5        | 76,2        | 69,1        | 61,7       | 58,9       | 54,4        | 72,7        | -1,2       |                           |
| 2  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>3,8</b>                       | <b>1,5</b>  | <b>4,0</b>  | <b>4,1</b>  | <b>3,5</b>  | <b>3,4</b>  | <b>2,3</b>  | <b>2,0</b> | <b>2,2</b> | <b>2,6</b>  | <b>3,2</b>  | <b>1,1</b> |                           |
| 3  | Vegetace; před                     | 95,1                             | 45,8        | 113,3       | 83,9        | 79,5        | 77,1        | 65,3        | 52,9       | 50,7       | 47,7        | 73,1        |            |                           |
| 3  | Vegetace; za                       | 68,4                             | 37,4        | 93,2        | 61,2        | 57,2        | 55,3        | 50,0        | 45,3       | 44,1       | 42,3        | 52,0        |            |                           |
| 3  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>26,7</b>                      | <b>8,4</b>  | <b>20,1</b> | <b>22,7</b> | <b>22,3</b> | <b>21,8</b> | <b>15,3</b> | <b>7,6</b> | <b>6,6</b> | <b>5,4</b>  | <b>21,1</b> |            |                           |
| 4  | Dormance; travní porost před (1 m) | 96,7                             | 62,0        | 110,6       | 88,6        | 85,0        | 83,7        | 77,2        | 69,3       | 67,5       | 65,1        | 79,8        |            |                           |
| 4  | Dormance; travní porost za (10 m)  | 95,3                             | 59,0        | 106,1       | 76,5        | 74,1        | 73,1        | 70,0        | 65,5       | 64,1       | 61,9        | 70,7        |            |                           |
| 4  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>1,4</b>                       | <b>3,0</b>  | <b>4,5</b>  | <b>12,1</b> | <b>10,9</b> | <b>10,6</b> | <b>7,2</b>  | <b>3,8</b> | <b>3,4</b> | <b>3,2</b>  | <b>9,1</b>  |            |                           |
| 4  | Vegetace; travní porost před (1 m) | 97,5                             | 60,5        | 109,7       | 88,2        | 85,0        | 83,8        | 78,1        | 70,4       | 68,7       | 66,1        | 80,1        | 0,3        |                           |
| 4  | Vegetace; travní porost za (10 m)  | 79,7                             | 57,2        | 99,5        | 76,1        | 73,9        | 73,0        | 69,9        | 65,0       | 63,6       | 61,0        | 70,4        | -0,3       |                           |
| 4  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>17,8</b>                      | <b>3,3</b>  | <b>10,2</b> | <b>12,1</b> | <b>11,1</b> | <b>10,8</b> | <b>8,2</b>  | <b>5,4</b> | <b>5,1</b> | <b>5,1</b>  | <b>9,7</b>  | <b>0,6</b> |                           |
| 5  | Dormance; před pásem zeleně (1 m)  | 94,3                             | 59,4        | 110,1       | 89,0        | 84,7        | 83,3        | 77,3        | 68,8       | 67,2       | 64,2        | 79,7        |            |                           |
| 5  | Dormance; za pásem zeleně (10 m)   | 94,7                             | 57,0        | 105,3       | 75,9        | 73,3        | 72,1        | 68,9        | 64,6       | 63,4       | 61,2        | 69,7        |            |                           |
| 5  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>-0,4</b>                      | <b>2,4</b>  | <b>4,8</b>  | <b>13,1</b> | <b>11,4</b> | <b>11,2</b> | <b>8,4</b>  | <b>4,2</b> | <b>3,8</b> | <b>3,0</b>  | <b>10,0</b> |            |                           |
| 5  | Vegetace; před pásem zeleně (1 m)  | 97,7                             | 60,2        | 110,0       | 89,6        | 85,2        | 83,6        | 77,9        | 69,6       | 67,7       | 65,2        | 80,2        | 0,5        |                           |
| 5  | Vegetace; za pásem zeleně (10 m)   | 79,6                             | 57,8        | 95,6        | 74,5        | 72,6        | 71,8        | 68,6        | 64,0       | 62,7       | 60,5        | 69,1        | -0,6       |                           |
| 5  | <b>Rozdíl</b>                      | <b>18,1</b>                      | <b>2,4</b>  | <b>14,4</b> | <b>15,1</b> | <b>12,6</b> | <b>11,8</b> | <b>9,3</b>  | <b>5,6</b> | <b>5,0</b> | <b>4,7</b>  | <b>11,1</b> | <b>1,1</b> |                           |
| 6  | Vegetace; travní porost (1 m)      | 87,8                             | 42,1        | 103,2       | 77,5        | 74,6        | 72,9        | 65,0        | 54,1       | 50,8       | 45,8        | 69,0        |            |                           |
| 6  | Vegetace; travní porost (10 m)     | 77,2                             | 45,2        | 93,8        | 71,4        | 67,8        | 66,4        | 60,1        | 51,5       | 49,9       | 47,0        | 62,8        |            |                           |
| 6  | Vegetace; travní porost (14 m)     | 80,3                             | 41,7        | 94,4        | 68,0        | 64,5        | 63,2        | 57,3        | 48,9       | 47,4       | 45,4        | 59,8        |            |                           |
| 6  | <b>Rozdíl 1-10</b>                 | <b>10,6</b>                      | <b>-3,1</b> | <b>9,4</b>  | <b>6,1</b>  | <b>6,8</b>  | <b>6,5</b>  | <b>4,9</b>  | <b>2,6</b> | <b>0,9</b> | <b>-1,2</b> | <b>6,2</b>  |            |                           |
| 6  | <b>Rozdíl 1-14</b>                 | <b>7,5</b>                       | <b>0,4</b>  | <b>8,8</b>  | <b>9,5</b>  | <b>10,1</b> | <b>9,7</b>  | <b>7,7</b>  | <b>5,2</b> | <b>3,4</b> | <b>0,4</b>  | <b>9,2</b>  |            |                           |
| 7  | vegetace; travní porost (1 m)      | 86,7                             | 41,7        | 105,0       | 79,6        | 75,9        | 73,5        | 64,4        | 51,2       | 48,4       | 44,2        | 69,1        |            |                           |
| 7  | vegetace; porost tis (10 m)        | 75,4                             | 41,7        | 94,1        | 69,8        | 65,9        | 64,6        | 58,0        | 47,9       | 46,5       | 44,4        | 60,8        |            |                           |
| 7  | Vegetace; porost borovice (14 m)   | 81,6                             | 40,0        | 93,1        | 67,2        | 63,9        | 62,4        | 56,0        | 47,4       | 45,8       | 43,6        | 58,8        |            |                           |
| 7  | <b>Rozdíl 1-10</b>                 | <b>11,3</b>                      | <b>0,0</b>  | <b>10,9</b> | <b>9,8</b>  | <b>10,0</b> | <b>8,9</b>  | <b>6,4</b>  | <b>3,3</b> | <b>1,9</b> | <b>-0,2</b> | <b>8,3</b>  |            |                           |
| 7  | <b>Rozdíl 1-14</b>                 | <b>5,1</b>                       | <b>1,7</b>  | <b>11,9</b> | <b>12,4</b> | <b>12,0</b> | <b>11,1</b> | <b>8,4</b>  | <b>3,8</b> | <b>2,6</b> | <b>0,6</b>  | <b>10,3</b> |            |                           |

Tab. 2: Výsledky měření hladin akustického tlaku před a za protihlukovou stěnou

Tab. 2: Results of measurements of sound pressure levels in front of and behind the noise barrier

Measurements during the dormant and growing seasons were verified on a conventional/classic full NB structure (No. 1), which is greened with Virginia creeper that forms a continuous cover on the noise barrier during the growing season. The green cover on the conventional noise barrier increased its acoustic efficiency (attenuation) by 1.8 dB compared to the dormant phase, see Tab. 2.

The second measurement was carried out on a separate loose tubular structure/fence (No. 2), where different varieties of Virginia creeper are also growing along the stretched wires; here it is not a NB in the true sense of the word, but a tubular structure covered with woody lianas, see Fig. 3. The structure consists of five horizontal metal tubes with a spacing of 0.7 m. The greening of the structure increased the efficiency of acoustic attenuation in the vegetation phase by 1.1 dB, see Tab. 2, last column.

The next evaluated NB (No. 3) is located at an immediate distance from the road. The height of the top of the wall varies between 2.6–3.0 m depending on the rotation of the individual boxes (possibly increased by the actual plants and shrubs in the highest box), which are filled with loam and planted with durable plants, Virginia creeper and plants of genus *Cotoneaster* and *Fallopia*. However, in some boxes the plants are not rooted. This is a combination of reflective and absorptive NB (at all other measurement locations are noise barrier absorptive). An attenuation of 21.1 dB was measured at an average noise barrier height of 3.0 m, which is slightly higher than for conventional barriers of the same height at the road [15].

Synchronous measurements of grassland and deciduous woody plants (Nos. 4 and 5) were carried out on two sections of the same road 80 m apart and perpendicular to the road at distances of 1 m and 10 m from the roadside. It is therefore a free spreading area with absorbent terrain and grass. The natural green barrier consists of deciduous woody trees and shrubs with a width of 8.0 m and a length of approximately 200 m. The achieved acoustic attenuation (including the attenuation of a distance from 1 m to 10 m) of the grass cover in winter is 9.1 dB, for bare deciduous trees and shrubs an attenuation of 10.0 dB was achieved. The occasional wood mass in the space increased the acoustic attenuation by 0.9 dB. During the growing season, due to the greening of the lawn, the attenuation of the grass area increased to 9.7 dB and the mass of leafy greenery increased to 11.1 dB (by 0.6 dB and 1.1 dB respectively). There is an increase in acoustic attenuation of 0.6 dB comparing an area of ground (loam) with dwarf winter grass and leaves against a fully green lawn, and in the case of a deciduous tree belt there is an increase in attenuation of 1.1 dB, see the last column of Tab. 2. During the growing season, the attenuation within 10 m from the road between the grass belt and deciduous wood plants increased to 1.4 dB (from the winter value of 0.9 dB). A difference of 2.0 dB in favour in the vegetation phase was achieved in the case of comparison of measured attenuation values of the non-reflective ground surface (loam) in the dormant phase against an 8 m wide of green tree belt at 10 m from the road with different vegetation density in the growing phase. The results are shown in Tab. 2.

Synchronous measurements of coniferous species (No. 7), namely yew, denser cover of pine and grassland (No. 6), were carried out at two locations along the same road 15 m apart (measuring points on both sides of the road) at distances of 1 m, 10 m, and 14 m from the roadside. Measurements were performed only during the vegetation phase (coniferous species are evergreen). Table 2 shows the measured results. The

Měření v období vegetačního klidu a v období vegetačního růstu bylo ověřováno na běžné/klasické plně konstrukci PHS (č. 1), která je ozeleněna loubincem, který tvoří v době vegetační fáze na PHS souvislý porost. Zelený porost na klasické PHS zvýšil její akustickou účinnost (útlum) o 1,8 dB oproti fázi vegetačnímu klidu, viz Tab. 2.

Druhé měření bylo realizováno na samostatné volné trubkové konstrukci/plotu (č. 2), kde se po natažených drátech také pnou různé odrůdy loubince, zde nejde v pravém slova smyslu o PHS, nýbrž o trubkovou konstrukci, která je porostlá dřevnatými liánami, viz Obr. 3. Konstrukce je tvořena z pěti horizontálních kovových trubek rozteče 0,7 m. Ozelenění konstrukce zvýšilo účinnost akustického útlumu ve fázi vegetace o 1,1 dB viz Tab. 2, poslední sloupec.

Další hodnocená PHS (č. 3) je umístěna v bezprostřední vzdálenosti od vozovky. Výška vrcholu stěny kolísá mezi 2,6–3,0 m dle střídání jednotlivých boxů (případně navýšená o vlastní rostliny a keře v nejvyšším boxu), které jsou vyplněny hlínou a osázené skalničkami, loubincem, skalníkem a opletkou, ovšem v některých truhlících rostliny nezakořenily. Zde se jedná o kombinaci odrazivé a pohltivé PHS (na všech ostatních místech měření je bariéra pohltivá). Při průměrné výšce PHS 3,0 m byl naměřen útlum 21,1 dB, což je mírně vyšší hodnota než u klasických stěn stejné výšky u komunikace [15].

Synchronní měření travnatého porostu a listnatých dřevin (č. 4 a 5) bylo realizováno na dvou úsecích stejné komunikace vzdálených od sebe 80 m a kolmo ke komunikaci ve vzdálenostech 1 m a 10 m od krajnice. Jedná se tedy o území volného šíření s pohltivým terénem a trávou. Přírozenou zelenou bariéru tvoří opadavé listnaté dřeviny a keře šířky 8,0 m a délky cca 200 m. Dosahovaný akustický útlum (včetně útlumu vzdálenosti z 1 m na 10 m) porostu trávy v zimním období je 9,1 dB, u holých listnatých dřevin a keřů byl dosažen útlum 10,0 dB. Tj. občasná dřevěná hmota v prostoru zvýšila akustický útlum o 0,9 dB. V období vegetace, vlivem zazelenění trávníku, narostl útlum travní plochy na 9,7 dB a masy listnaté zeleně na 11,1 dB (o 0,6 dB a 1,1 dB). Při porovnání plochy země (hlíny) se zakrslou zimní trávou a listím a plně zeleného trávníku dojde ke zvýšení akustického útlumu o 0,6 dB, v případě pásu opadavých dřevin je zvýšení útlumu o 1,1 dB, viz poslední sloupec Tab. 2. V období vegetace se útlum v 10 m od komunikace mezi pásem trávy a opadavými dřevinami zvýšil na 1,4 dB (ze zimní hodnoty 0,9 dB). V případě srovnání naměřených hodnot útlumu neodrazivé plochy země (hlíny) ve fázi dormance vůči pásu zelených dřevin šířky 8 m ve vzdálenosti 10 m od pozemní komunikace s různou hustotou porostu ve fázi vegetace bylo dosaženo rozdílu 2,0 dB ve prospěch dřevin ve vegetační fázi. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 2.

Synchronní měření jehličnatých dřevin (č. 7), konkrétně tisů, hustšího porostu borovice a travního porostu (č. 6), bylo realizováno na dvou lokalitách u stejné komunikace vzdálených od sebe 15 m (měřicí místa z jedné a druhé strany komunikace) ve vzdálenostech 1 m, 10 m a 14 m od krajnice. Měření proběhla pouze v období vegetace z důvodu neopadávání jehličnatých dřevin. V tabulce 2 jsou uvedené naměřené vý-



acoustic attenuation of the grass cover in the vegetation season achieved 6.2 dB, including the attenuation of distance from 1 m to 10 m. The lower value compared to the leafy woody plants area is due to the not quite ideal surrounding area (there was an equally 2.0 m wide asphalt pavement on both sides of the road). A direct comparison of the results between the measurement of deciduous and coniferous woody plants is not possible due to the different surrounding terrain, traffic intensity and composition, including the speed limit. The achieved attenuation of the yew against the grass cover at the same distance is 2.0 dB, which is higher than the difference between the deciduous vegetation and the grass cover at the same distance (see measurements Nos. 4 and 5), where the attenuation is 1.4 dB (all in the vegetation phase). The significantly narrower and lower yew has a resulting attenuation better by 0.6 dB compared to more permeable deciduous vegetation, because it is a dense, impenetrable conifer bush, with the texture clearly visible from Fig. 4. In the case of the last measurement, at 14 m from the road in the area 'most densely' covered with pine trees between the local road and the measurement site, it is evident that the cover of live vegetation does not reach the level and intensity of dense impenetrable coniferous shrubs and the attenuation achieved here is 1.0 dB.

It is therefore clear that in both deciduous and coniferous species, acoustic attenuation is significantly dependent on the inherent density of the stands, which prevents noise penetration. The results indicate that a short dense strip of coniferous shrubs relative to a grass belt at the same location in the vegetation season or a wide wall of deciduous woods in the vegetation phase against a grassland during the dormant season at the same location achieves an additional attenuation of 2.0 dB. This may already represent a significant benefit, as in the case of a reflective surface (e.g. paved/concreted parking spaces instead of loam), this attenuation "gain" will be even more significant. It is important to note that a 3 dB noise reduction is equivalent to halving the traffic intensity on a given road.

sledky. Dosahovaný akustický útlum, včetně útlumu vzdálenosti z 1 m na 10 m, porostu trávy v období vegetace je 6,2 dB. Nižší hodnota oproti místu s listnatými dřevinami je dána ne zcela ideálním okolním prostorem (z obou stran komunikace byl stejně široký asfaltový chodník šíře 2,0 m). Přímé porovnání výsledků mezi měřením listnatých a jehličnatých dřevin není možné kvůli jinému okolnímu terénu, intenzitě a skladbě dopravy, včetně povolené rychlosti. Dosahovaný útlum tísového porostu vůči travnatému porostu v téže vzdálenosti je 2,0 dB, což je vyšší hodnota než rozdíl mezi listnatým porostem a travnatým porostem ve stejné vzdálenosti (viz měření č. 4 a 5), kde je útlum 1,4 dB (vše v období vegetace). Výrazně užší a nižší porost má výsledný útlum lepší o 0,6 dB, jedná se ovšem o hustý, neprostupný jehličnatý keř, kdy struktura je jasně patrná z Obr. 4, oproti prostupnější listnaté vegetaci. V případě posledního měření ve vzdálenosti 14 m od komunikace v oblasti „nejhustěji“ pokrytou borovicemi mezi místní pozemní komunikací a místem měření je patrné, že krytí živým porostem nedosahuje míry a intenzity hustého neprostupného jehličnatého keře a dosahovaný útlum je zde 1,0 dB.

Je tedy zřejmé, že u opadavých i jehličnatých dřevin je akustický útlum významně závislý na vlastní hustotě porostu, která brání pronikání hluku. Z výsledků vyplývá, že krátký hustý pás jehličnatého keře vůči travnatému pásu v tomtéž místě v období vegetace nebo široká stěna tvořená opadavými listnatými dřevinami ve fázi vegetace vůči travnaté ploše v období dormance v tomtéž místě dosahuje dodatečného útlumu hluku 2,0 dB. To již může představovat významný benefit, jelikož v případě odrazivé plochy (např. místo hlíny vyasfaltovaná/vybetonovaná parkovací místa) bude tento „zisk“ útlumu ještě výraznější. Je nutné si uvědomit, že snížení hluku o 3 dB představuje ekvivalent snížení intenzity provozu na dané pozemní komunikaci na polovinu.



Fig. 4: Measuring location No. 7 at 1 m from the road, with a subsequently measured yew hedge in the background

Obr. 4: Měřicí lokalita č. 7 ve vzdálenosti 1 m od komunikace, v pozadí následně měřený živý plot tisy

## 4. CONCLUSION

Protection against excessive traffic noise is currently an essential factor in our daily lives. Realized measurements have shown that the inherent greenery, both in the dormant and vegetation phases, has a certain anti-noise effect. The measurements were always carried out in the immediate vicinity of the road. The microphone in front of the barrier was placed 1.0 m in front of the NB and was 0.5–2.5 m away from the roadside. The effect of meteorological conditions (e.g. wind) on sound propagation should not be a dominant source of measurement uncertainty at these short distances. (Measurements were performed under meteorologically favourable conditions.) The attenuation of the achieved noise level was not dependent on the traffic intensity. This affected only the “maximum” noise level at a given location, while the absolute difference in the synchronous measurements in front of and behind the barrier was constant. During the vegetation season, when greening occurs, there was clear evidence of a more pronounced acoustic attenuation compared to dormant phase (see Table 2). The case study shows similar results [16]. The achieved attenuation is also related to the density (permeability) of the vegetation itself, which was more important than the width of the belt of ordinary park greenery (deciduous). The greatest attenuation was achieved for narrow low yew (measurement No. 7 – 1.5 m wide, 1.6 m high) than for deciduous park greenery during the growing season (measurement No. 5 – 8 m wide, variable height from grass, shrubs, young and mature trees up to 6 m high). The density of the inherent foliage has not been determined, e.g. using laser measurement (LIDAR) [17]. The inherent dense grass and leaves contribute to noise reduction. Together with aesthetic, microclimatic function and dust particle trapping, vegetated noise barriers can be evaluated positively. A partial increase in acoustic attenuation with the use of greenery as an additional element or component of individual noise barrier has been demonstrated. However, due to the achieved additional attenuation of about 1–2 dB (depending on the phase: dormant/vegetation, type: grass, deciduous/non-deciduous species, etc.), this element can be recommended for use mainly as a supplement, also according to [18]. The separate use of vegetation primarily for the purpose of significant noise protection is significantly weaker compared to conventional NB. The disadvantage of vegetated noise barriers is that over time the root system may grow into the noise barrier and so the noise barrier can gradually degrade.

## ACKNOWLEDGEMENT

This article was created with the financial support of the Ministry of Transport under a programme of long-term conceptual development of research organisations.

## 4. ZÁVĚR

Ochrana proti nadměrnému hluku z dopravy je v současné době nezbytným faktorem v našem každodenním životě. Realizovaná měření prokázala, že vlastní zeleň jak ve fázi dormance, tak ve fázi vegetace, má jistý protihlukový účinek. Měření probíhala vždy v bezprostřední blízkosti u pozemní komunikace. Mikrofon před bariérou, který byl vždy umístován 1,0 m před PHS, byl zároveň ve vzdálenosti 0,5–2,5 m od krajnice. Vliv meteorologických podmínek (např. vítr) na šíření zvuku by v těchto krátkých vzdálenostech neměl představovat dominantní zdroj nejistoty měření. (Měření byla prováděna za meteorologicky příznivých podmínek.) Útlum dosahované hlučnosti nebyl závislý na intenzitě provozu. Ta ovlivňovala jen „maximální“ hladinu hluku v daném místě, přičemž absolutní rozdíl hodnot při synchronním měření před a za bariérou byl konstantní. V období vegetace, kdy dojde k ozelenění, byl jednoznačně prokázán výraznější akustický útlum oproti stavu dormance (viz tabulka 2). Podobné výsledky vykazuje případová studie [16]. Dosahovaný útlum souvisí i s hustotou (prostupností) vlastní vegetace, která byla důležitější než šířka vlastního pásu běžné parkové zeleně. Největší útlum byl dosažen u úzkého nízkého tisu (místo měření č. 7 – šířka 1,5 m, výška 1,6 m) než u parkové zeleně v době vegetace (místo měření č. 5 – šířka 8 m, proměnná výška od trávy, keřů, mladých i vzrostlých stromů výšky až 6 m). Hustota vlastní zeleně nebyla stanovena, např. pomocí měření technologií laseru (LIDAR) [17]. Také vlastní hustá tráva a listí přispívají ke snížení hluku. Spolu s estetickou, mikroklimatickou funkcí a zachytáváním prachových částic lze ozeleněné PHS hodnotit pozitivně. Dílčí zvýšení akustického útlumu s využitím zeleně jako dalšího prvku nebo komponenty jednotlivých protihlukových stěn bylo prokázáno. Ovšem vzhledem k dosahovanému dodatečnému útlumu v úrovni cca 1–2 dB (dle fáze: dormance/vegetace, typu: tráva, opadané/neopadavé dřeviny, aj.) lze tento prvek doporučit k využití především jako doplňku i podle [18]. Samostatné využití zeleně primárně za účelem výrazné protihlukové ochrany oproti konvenčním PHS je výrazně slabší. Nevýhodou ozelenění PHS představuje skutečnost, že časem může dojít k prorůstání kořenového systému do protihlukové stěny a může tak postupně docházet k degradaci protihlukové stěny.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.



## REFERENCES

- [1] Nový, R. Noise and vibration. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9. (Available only in Czech language.)
- [2] Houthuijs, D., et al. ETC/ACM Technical Paper 2017/10. Method to estimate the road traffic noise exposure distribution in Europe. ETC/ACM (European topic centre on air pollution and climate change mitigation), 2018.
- [3] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise, 2002.
- [4] Kotzen, B. Environmental Noise Barriers: A guide to their visual and acoustic Design, E & FN Spon 2003, ISBN 0-419-23180-3, 2003.
- [5] Supuka, J. The ecological principles of green creation and conservation. Bratislava: Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1991. ISBN 80-224-0128-5. (Available only in Slovak language.)
- [6] HOSANNA, collaborative project. Novel solutions for quieter and greener cities. 2013. EC project number: 234306.
- [7] Tzortzi N. a J. Sophocleous. The green wall as sustainable tool in Mediterranean cities: The case study of Limassol, Cyprus. WSEAS Transactions on Environment and Development 14, 270–285, 2018. ISSN 2224-3496.
- [8] Eyring C.F. Jungle Acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America. 1946, 18(2), 257–270. DOI: 10.1121/1.1916362. ISSN 0001-4966.
- [9] Martens M.J.M. Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber. The Journal of the Acoustical Society of America. 1980, 67(1), 66–72. DOI: 10.1121/1.383790. ISSN 0001-4966.
- [10] Van Renterghem T. Guidelines for optimizing road traffic noise shielding by non-deep tree belts. Ecological Engineering. 2014, 69, 276–286. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.04.029. ISSN 09258574.
- [11] Zhang Q., L. Zhao, H. Ciu. Investigation of the noise reduction provided by vegetation belt in different design styles. Buenos Aires: 22nd International Congress on Acoustics, 2016.
- [12] Van Renterghem T., D. Botteldooren, K. Verheyen. Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. Journal of Sound and Vibration. 2012, 331(10), 2404–2425. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.01.006. ISSN 0022460X.
- [13] ISO 1996: Acoustics - Description, measurement, and assessment of environmental noise, 2017.
- [14] Celostátní sčítání dopravy 2016 [online]. Ředitelství silnic a dálnic ČR. Dostupné z: <http://scitani2016.rsd.cz/pages/informations/default.aspx>.
- [15] Krivánek V., P. Marková, B. Hablovičová, a R. Ličbinský. Practical verification of noise reduction by different types of noise barriers. Akustika. 33, 30–42. ISSN 1801-9094.
- [16] Tekeykhah J., S.M. Hosseini, G. Jalali, J. Alavi a A.E. Sari. Species-related difference to noise reduction between trees in urban forest: The Abidar forest park (case study). Sound & Vibration 53(6), 263–276, 2019. DOI: 10.32604/sv.2019.07157. ISSN 2693-1443.
- [17] Rybansky M., M. Brenova, J. Cermak, J. Van Genderen a Å. Sivertun. Vegetation structure determination using LIDAR data and the forest growth parameters. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 37, 2016. DOI: 10.1088/1755-1315/37/1/012031. ISSN 1755-1307.
- [18] Biocca M., P. Gallo, G. Di Loreto, G. Imperi, D. Pochi a L. Fornaciari. Noise attenuation provided by hedges. Journal of Agricultural Engineering 50(3), 113–119, 2019. DOI: 10.4081/jae.2019.889. ISSN 2239-6268.



**Ing. Petra Markova**, graduate of Mendel Agriculture and Forestry University in Brno, has been working in Transport Research Centre (CDV) since 2005. Her main activity in the field of transport and the environment is focused on the environmental acoustics. Her work includes assessing acoustic situations around roads, assessing acoustic situations with the use of measurements and numeric modelling with the use of a software system SoundPLAN, and subsequent assessing transport noise impact on population. She is currently involved in a project "Critical analysis of new materials and new shapes suitable for noise barriers and proposals for their use in rail and road transport", "Analysis and monitoring of road surface noise changes" and "Urban planning using low-noise roads". In the field of transport noise she also participates in "Sustainable Urban Mobility Plans".



**Ing. Vitezslav Krivanek**, Ph.D., 1981, is a graduate of Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication. In his post graduate study in 2005 – 2008 he participated in research projects of FRVŠ, GAČR, NBÚ, MPO ČR, NPV II. In 2002 - 2011 he cooperated with a leisure activity centre Junior – DDM in Brno, where he participated in educational and preventive activities concerning free time of children and the youth in the Department of Science and Technology for Everybody. Since 2008 he has been working in Transport Research Centre (CDV) as a researcher in the field of transport environmental aspects. Recently he has cooperated in CDV in R&D projects: "Quantification of external costs of transport in the Czech Republic, Virtual education in transport, Education of youth to sustainable transport, Critical analysis of new materials and new shapes suitable for noise barriers, Tools for Analysis and Assessment of Environmental Impacts of Road Surface Noise, Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure". Furthermore, he produces noise studies, expertise in noise from transport, he is a member of an accredited laboratory No. 1506 for measuring traffic noise, and a member in an international work group CEN TC 227 WG5. Since 2019 he is a guarantor of a project "Urban planning using low-noise roads".



**Ing. Blanka Hablovicova**, graduate of the University of Pardubice and since 2018 has been working in Transport Research Centre (CDV). She deals with traffic noise from the environmental point of view which includes noise generated around roads. She collaborates in projects "Critical analysis of new materials and new shapes suitable for noise barriers and proposals for their use in rail and road transport" and "Analysis and monitoring of road surface noise changes". She also participates in the (SUMP) of towns and cities in the Czech and Slovak Republic. She also contributes (since 2019) in a TAČR research project "Urban planning using low-noise roads".



**Jindřich Frič**, graduated in 2001 from the Faculty of Mechanical Engineering VSB - TU Ostrava, the branch Transport Technology. From 2004 to 2008 he worked at Czech Ministry of Transport (Transport Safety Department) as a chief/ministerial counsel, opposing worker for Research projects, a member of body of editors, commissioner for road safety auditor, a member of the board for SFDI program, a member of the assessing committee of the traffic competition Soothing, an expert of working group EK for preparation of the directive "Infrastructure" 96/2008 and a representative MD CR in CIECA. From 2009 to 2019 he was expert advisor for EU parliament member in the field of Road safety. From 2008 to 2016 he was a director of Safety Division and Transport Engineering of the Transport Research Centre (CDV). He represents CDV in both national and international organizations and associations as FERSI, ECTRI, PIARC, ETSC, HUMANIST and CSSP. Since 2016 he has been working as a director CDV.