# SEISMIC EFFECTS OF ABOVE AND UNDERGROUND TRANSPORT ON BUILDINGS

**D. Makovička[*], D. Makovička[**]**

**Summary:** *Building structures in the vicinity of above-ground or underground transport lines are loaded by vibrations excited by the passage of motor vehicles or trains. These vibrations propagate as technical seismicity effects through the soil to the foundations of buildings in the vicinity of their source. Due to its tuning the building structure usually amplifies the effects of technical seismicity. These vibration levels may have an impact on people working or living in the buildings, or on sensitive equipment installed in the buildings.*

## 1. Úvod

Charakter vibrací od dopravy je závislý zejména na hmotnosti vozidla, rychlosti a způsobu jízdy vozidla a na směru pohybu vozidla. Dalším parametrem je „rovinnost" jízdní dráhy, ať již kvalita povrchu silniční vozovky nebo směrové a výškové vyrovnání kolejové dráhy, způsob upevnění kolejnic, skladba podkladních vrstev vozovky ap. Kromě parametrů vibrací ve zdroji má na velikost vibrací vliv složení prostředí na cestě od zdroje k ohrožené konstrukci budovy, tedy zvláště skladba geologického prostředí a jeho mechanické vlastnosti, tedy tuhost, rychlost šíření vlnění, útlum se vzdáleností ap. Konečně pak může velikost vibrací z podloží zesílit nebo utlumit provedení vlastní konstrukce budovy a způsobu jejího založení, zejména pak frekvenční naladění ohrožené konstrukce.

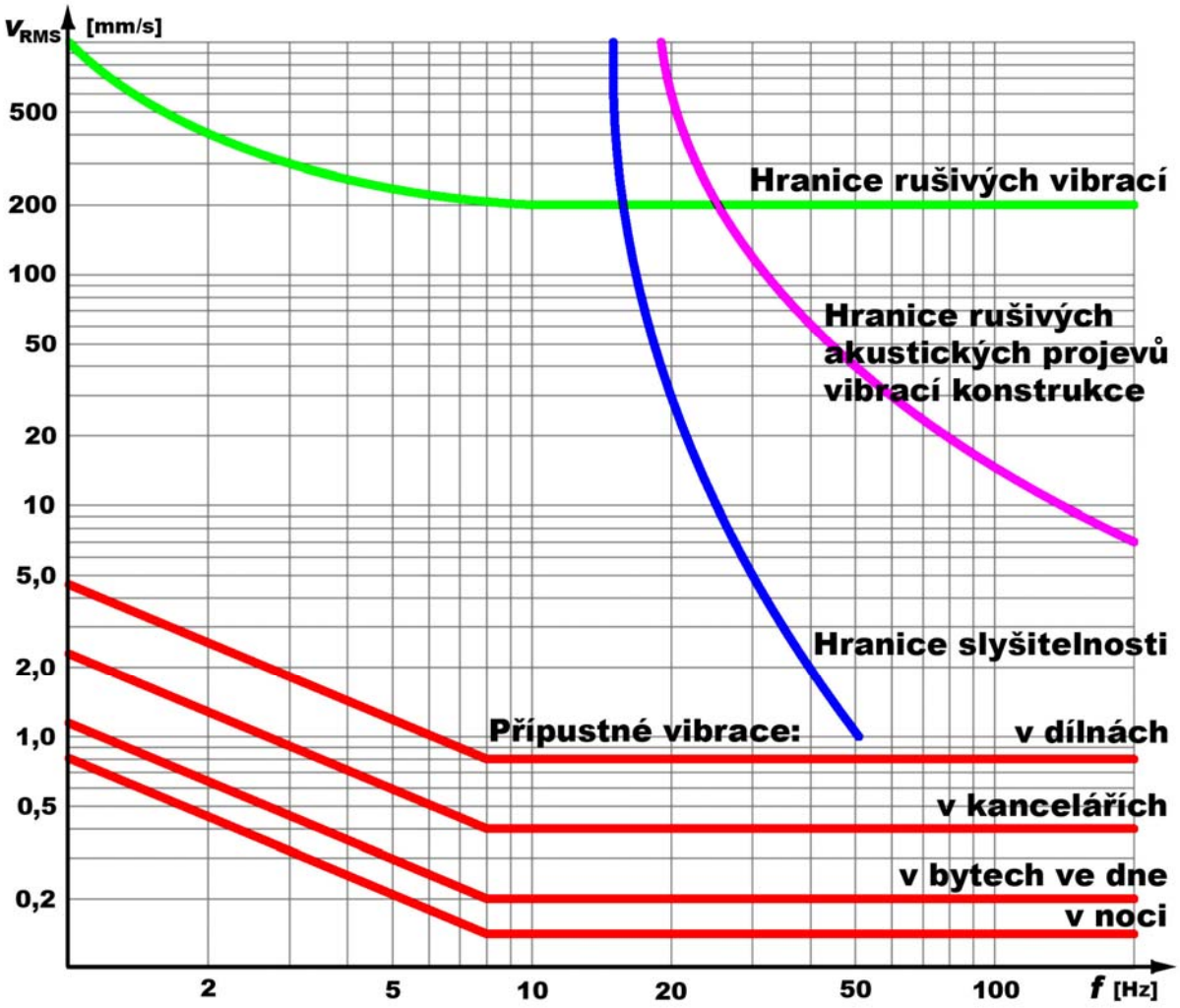
Vibrace šířící se podložím mají zpravidla vyšší intenzitu než vibrace od akustických jevů. Pro běžné stavby je však z hlediska bezpečnosti tato úroveň vibrací od běžné dopravy nevýznamná, s výjimkou historických objektů nebo objektů v chatrném stavu. Vznik větších významnějších trhlin může být vyvolán přejezdy velmi těžkých vozidel nebo provozem stavebních strojů (například vibračních válců) při výstavbě nových konstrukcí v blízkosti stávajících.

Dříve, než se začnou projevovat škody od vibrací od dopravy na ohrožené konstrukci, bývá vážnějším problémem působení vibrací na osoby v těchto konstrukcích. Vibrace tohoto typu obvykle mnohem dříve přesáhnou bezpečné limity udávané hygienickými normami (viz obr.1), než dojde k vytvoření trhlin a prasklin v konstrukci.

---

[*] Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc.: Czech Technical University in Prague, Klokner Institute; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: +420 224 353 856, fax: +420 224 353 511; e-mail: makovic@klok.cvut.cz

[**] Ing. Daniel Makovička, Static and Dynamic Consulting; Šultysova 170, 284 01 Kutná Hora; tel.: +420 608 029 251; e-mail: d.makovicka@makovicka.cz




Obr.1 Graf mezních vibrací (limitní hodnoty účinků na osoby podle ČSN ISO 2631)

## 2. Povrchová doprava

Proto, aby bylo možné najít zákonitosti a společné principy pro vibrace od vlivů dopravy byla provedena řada měření vibrací v blízkosti komunikací a domech zpravidla nízkopodlažních v okolí cest. Vybrané maximální naměřené hodnoty pro různé lokality jsou uvedeny v tab.1. Tato maxima naměřených vibrací jsou dokumentovány několika vybranými časovými průběhy vibrací a jejich FFT spektry. Na obr.2 (v tab.1 vozidlo Tatra) jsou uvedeny naměřené úrovně kmitání v těsné blízkosti vozovky při průjezdu plně naloženého nákladního automobilu rychlostí 20 až 30 km/h po místní asfaltové komunikaci s relativně malými nerovnostmi do 10 mm. Měření bylo provedeno též v přízemí nového nepodsklepeného rodinného domu vedle cesty v těsné blízkosti zdi čelní fasády a konečně i na úrovni podlahy 1. patra stejného domu, na vertikále nad stanovištěm v přízemí. Z těchto měření vyplývá obecně známá skutečnost, že jakákoliv konstrukce objektu vibrace z vozovky zesílí a to na vlastních frekvencích této konstrukce. Přenos vibrací od dopravy do stavební konstrukcí podložím je zpravidla potřebné podrobněji analyzovat, i když pro 1. skupinu mezních stavů je tato amplitudová úroveň vibrací velmi nízká.

Tab.1 Porovnání amplitudové úrovně zrychlení vibrací od dopravy na různých stanovištích

| Zdroj vibrací (vozidlo) | Lokalita | Interval zrychlení $a_{peak}$ [mm/s$^2$] | | Vzdálenost snímače od zdroje [m] | Umístění snímače |
|---|---|---|---|---|---|
| Tramvaj | Starší silnice 1.třídy, Praha | 18 | 22 | 12 | Obrubník chodníku |
| Kamión | | 12 | 13 | 5 | Obrubník chodníku |
| Metro | Praha 4 - Pankrác | 90 | 120 | 0 | Základy budovy nad |
| Metro | Praha 5 - Radlice | 30 | 65 | 0 | Nástupiště u koleje |
| Metro | | 15 | 17 | 0 | Obezdívka tubusu metra |
| Metro | Praha 5 - Hůrka | 121 | 690 | 15 | Hlava piloty |
| Kamión | Nová komunikace 1. třídy | 12 | 16 | 3 | Chodník u cesty |
| Kamión | | 13 | 14 | 8 | Schodiště do domu |
| Kamión | | 21 | 23 | 8 | Patro domu |
| Tatra | Obslužná komunikace mezi rodinnými domy | 14 | 19 | 8 | Přízemí domu |
| Tatra | | 30 | 36 | 8 | Patro domu |
| Tatra | | 19 | 23 | 1 | Obrubník u cesty |
| Tatra | | 12 | 18 | 10 | Schodiště do domu |
| Vlak | Železnice a souběžná silnice 1. třídy mimo město | 9 | 9 | 500 | Zkušební základ v nezastavěné oblasti |
| Kamión | | 2 | 8 | 500 | |
| Autobus | | 2 | 6 | 500 | |

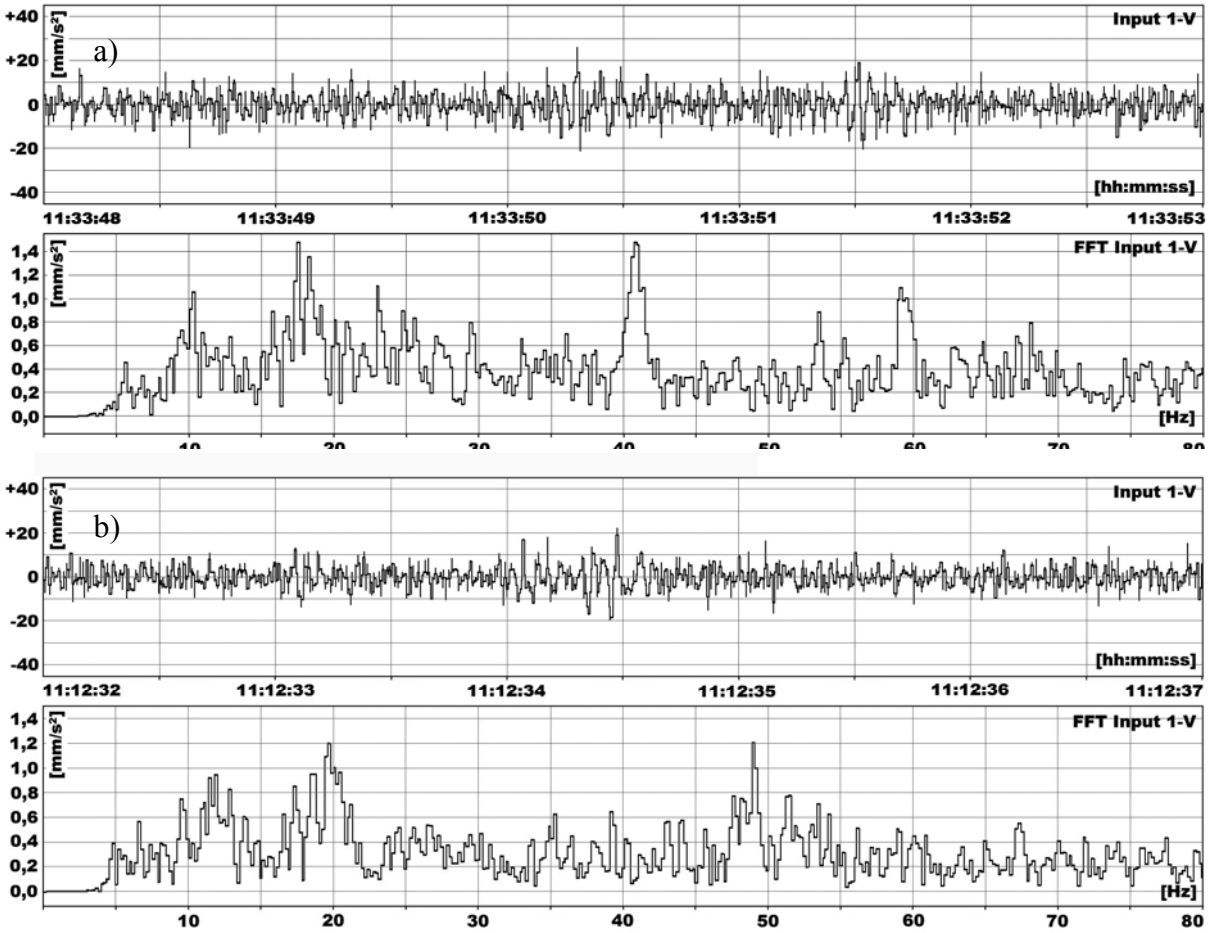
Tab.2 Porovnání efektivní úrovně zrychlení vibrací [mm/s$^2$] způsobené kamionem a autobusem při jízdě různou rychlostí po nerovné vozovce (podle Osama Hunaidi)

| Stanoviště | 25 km/h | | 50 km/h | |
|---|---|---|---|---|
| | Autobus | Kamion | Autobus | Kamion |
| Terén v blízkosti čelní fasády | 20,5 | 19,9 | 64,5 | 33,2 |
| Vnější zeď na úrovni základu | 11,2 | 10,1 | 30,9 | 15,7 |
| Střed podlahy v 1. podlaží | 20,3 | 20,8 | 62,9 | 30,1 |
| Střed podlahy ve 2. podlaží (1. | 35,0 | 37,3 | 96,2 | 46,7 |
| Poznámka: autobus byl vybaven vzduchovým odpružením, kamion měl ocelové listové pružiny. | | | | |

Dalším příkladem je dvoupodlažní rodinný dům v blízkosti velmi kvalitní nové komunikace 1. třídy při průjezdu kamionů okolo domu rychlostí cca 40 až 50 km/h. Měření bylo provedeno jak na chodníku vedle vozovky, tak na podlahách domu v přízemí a v 1. patře v blízkosti obvodových zdí. Z porovnání naměřených úrovní (tab.1) je zřejmé amplitudové zesílení vibrací uvnitř domu. Zesílení vibrací je na frekvenčních složkách, které odpovídají vlastním frekvencím konkrétního objektu, samozřejmě odlišných od předchozího případu.

Dalším příkladem jsou vibrace naměřené na obrubníku kvalitní starší městské komunikaci se silniční a tramvajovou dopravou v Praze od přejezdu těžké nákladní dopravy rychlostí 50

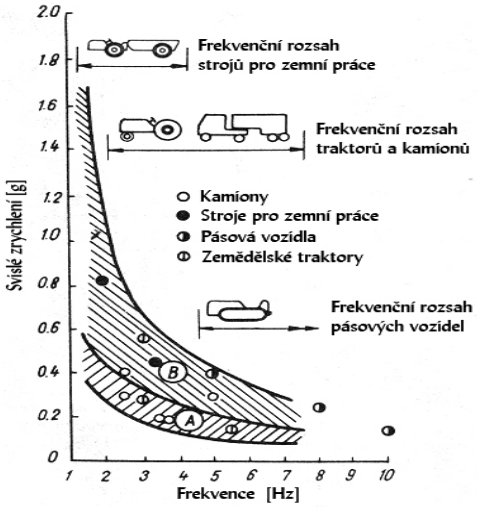
až 60 km/h a tramvajovou 40 až 50 km/h (viz tab.1). Z tohoto měření je zřejmé, že amplitudová úroveň vibrací od dopravy po kvalitním povrchu vozovky ať již se jedná o starší, dobře udržovanou, nebo novou komunikaci, je srovnatelná.




Obr.2 Přejezdy nákladního automobilu Tatra po místní komunikaci, záznamy časových průběhů vertikálních zrychlení a jejich FFT spektra, (a) vozovka, (b) přízemí domu

Pro porovnání se zahraničními zkušenostmi jsou v tab.2 podle Osama Hunaidi uvedeny výsledky kanadského měření jízdy kamionu a autobusu, stejné váhové kategorie po nerovné vozovce. Z evropských podmínek je uveden graf na obr.3 pro různé typy přejezdu kamionů a traktorů po běžných vozovkách (podle Major). Z porovnání obou zahraničních materiálů s našimi zkušenostmi je zřejmé, že jejich výsledky byly sestavovány převážně pro nerovné a případně nezpevněné povrchy vozovek. V případě městských nebo novějších komunikací vyšší třídy, jsou tyto vibrace nižší. Obecně lze konstatovat, že vibrace od silniční dopravy, které se šíří okolním prostředím do blízké zástavby, jsou na frekvencích v rozsahu přibližně 5 až 25 Hz. Amplitudově jsou vibrace v rozsazích mezi 0,005 až 2 $m/s^2$ ve zrychleních nebo 0,05 až 25 mm/s v rychlostech. Dominantní frekvence a amplitudy vibrací buzení objektu závisí na mnoha faktorech, především na vozovce, na hmotnosti a konstrukci vozidla a jeho rychlosti a způsobu jízdy (např. zastavení); typu, složení, ulehlosti a vlhkosti podloží vozovky a cesty k objektu, vzdálenosti vozovky od objektu, ročním období (např. zmrzlá horní vrstva

terénu, nebo suchá, rozmáčená) atd. Tyto faktory jsou vzájemně mezi sebou závislé a nelze stanovit jednoduché závislosti mezi nimi.



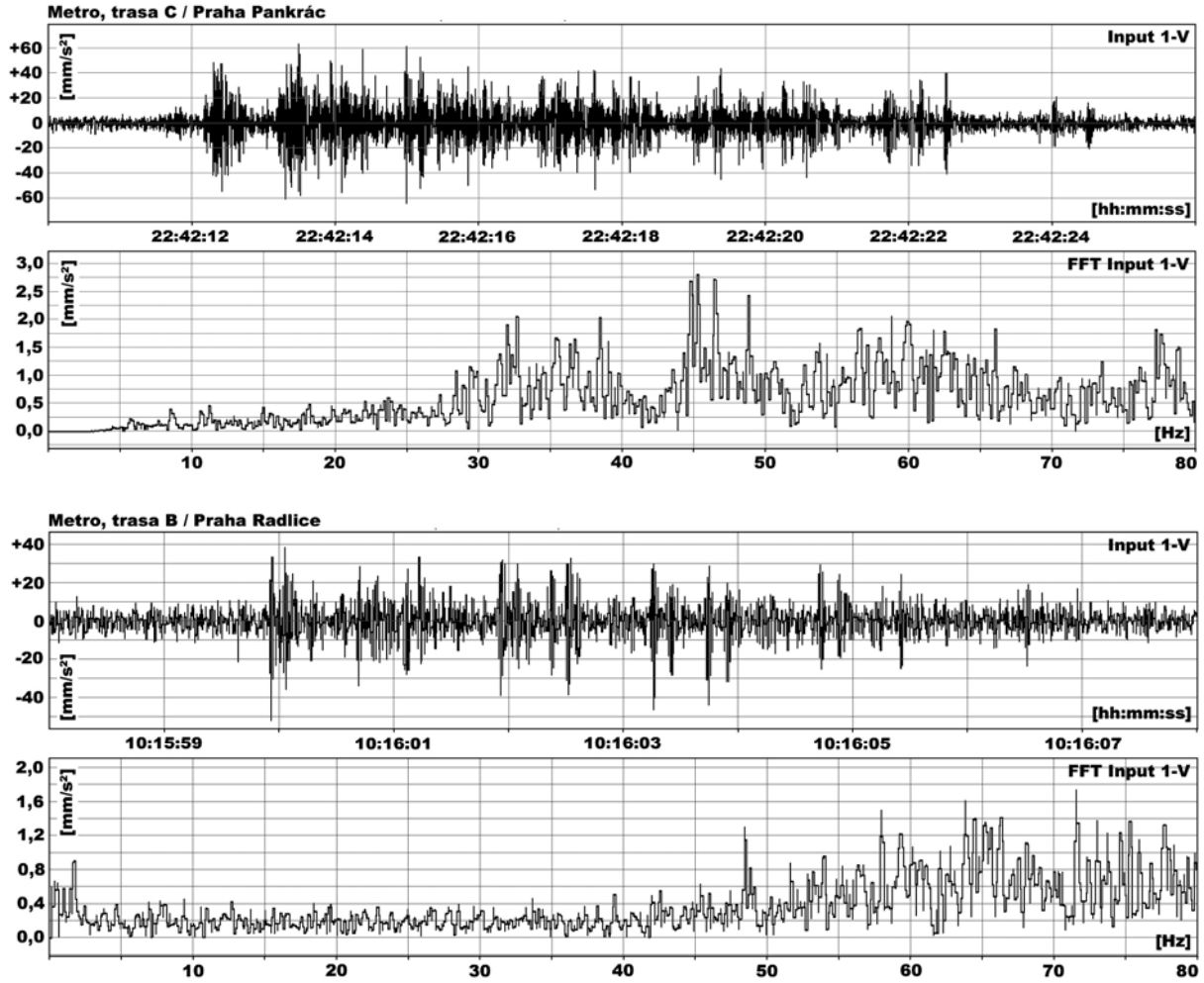

Obr.3 Vibrace působené přejezdy nákladních vozidel (podle Major)

Tak například vliv rychlosti vozidla spolu souvisí s rovinností jízdní dráhy. Obecně čím nerovnější je povrch jízdní dráhy, tím více rychlost vozidla ovlivňuje vybuzené amplitudy vibrací. Obdobně způsob jízdy vozidla, například vibrace při zastavení, závisí také na počáteční rychlosti vozidla a rovinnosti jízdní dráhy. Pro malé rychlosti a kvalitnějším povrchu vozovky je způsob zastavení prakticky nevýznamný ve srovnání s rychlostními komunikacemi nebo nerovnými vozovkami. Z tab.2 je zřejmé, že účinky kamionu a autobusu jsou při rychlosti 25 km/h srovnatelné, zatímco při rychlosti 50 km/h jsou účinky kamionu téměř dvojnásobné. Amplitudy budicích vibrací a jejich dominantní frekvence závisí také na typu zemin v podloží a jejich ulehlosti. Čím vyšší je tuhost podloží a menší útlum šíření vlnění v podloží, tím vyšší jsou amplitudy vibrací, které se přenáší do ohrožené konstrukce. Pro šíření vibrací podložím jsou pak významné vlastní frekvence zemin – pokryvných útvarů na skalním podkladu. V podmínkách ČR je obvyklá tloušťka zemin na skalním podkladu 2 až 4 m, pak mohou být vlastní frekvence zeminy na skalním podkladu blízké vlastním frekvencím budov (jejich stěn a stropů) a pak přenos vibrací od dopravy do stavebních konstrukcí je zesílen v důsledku rezonančního efektu.

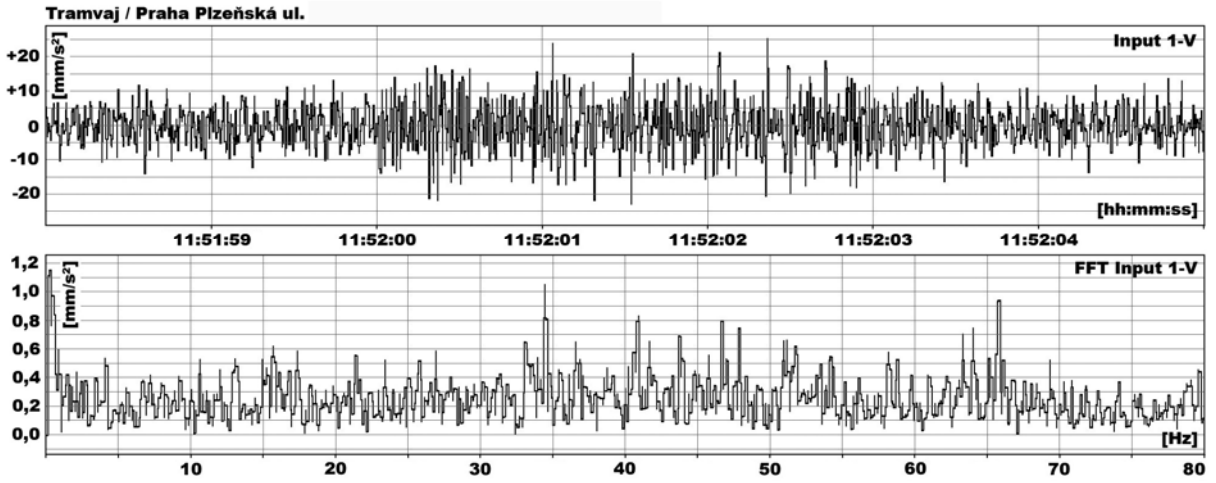
## 3. Kolejová doprava

Seismické zatížení od povrchové nebo podpovrchové kolejové dopravy se projevuje, obdobně jako v případě silniční dopravy, jako kinematické zatížení základových konstrukcí objektů v blízkosti těchto dopravních cest. Charakteristiky budicích vibrací v jednotlivých lokalitách, v návaznosti na typ vozidel, jejich jízdní dráhu, způsob jízdy ap., stejně jako u silniční dopravy, se mohou od sebe významně lišit. Z naměřených časových průběhů těchto účinků lze zpravidla identifikovat počty vagonů vlaků, vlivy počtu náprav, které se při průjezdu vlaku okolo měřeného stanoviště projeví na záznamech jednotlivými skupinami výkmitů a následným dokmitáním.

Míra odlišnosti naměřených vibrací od průjezdu vlaků metra je zřejmá z porovnání několika vybraných záznamů a jejich frekvenčních spekter z pražských podmínek.




Obr.4 Časové průběhy vertikálních zrychlení a jejich FFT spektra, měřené na konstrukci stanic metra v blízkosti kolejiště (Pankrác nahoře, Radlice dole)

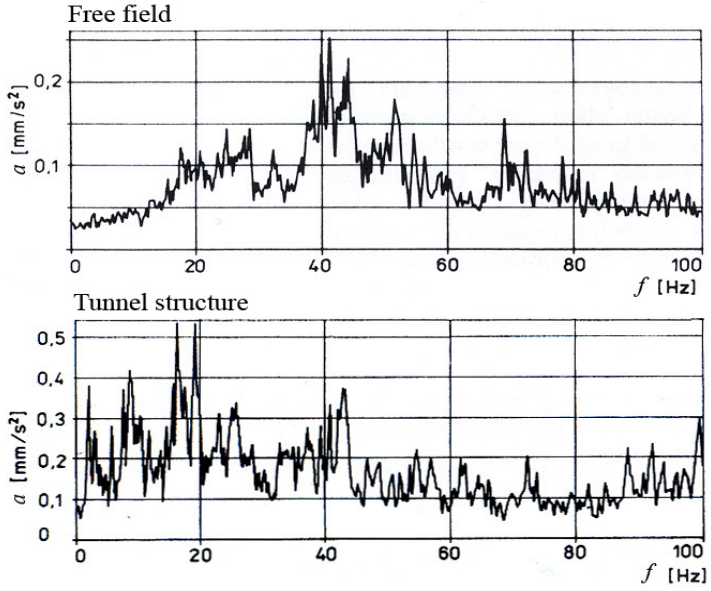



Obr.5 Časový průběh vertikálních zrychlení a jeho FFT spektrum, měřené na obrubníku vozovky Plzeňské ulice v Praze při přejezdu tramvaje

Vibrace od podpovrchového provozu metra (obr.4) i od povrchového provozu tramvají (obr.5) jsou porovnány v tab.1. Vibrace měřené v různých „klasických“ podmínkách (tedy při průjezdu tunelem metra nebo stanicí metra – viz např. obr.4) se mohou od sebe vzhledem ke stavební konstrukci metra lišit. tato odlišnost může být zvýrazněna např. zásadně odlišnou konstrukcí metra, jako je to např. na trase B poblíž stanice Hůrka, kde tunelová trasa přechází z tunelové do nadzemní mostní konstrukce. O velikosti vibrací zde rozhoduje i změna tuhosti podkladu jízdní dráhy.

Vibrace naměřené na stanovištích vedle tras metra, které procházejí přibližně ve stejné hloubce pod povrchem (mělké trasy) se projevují různými dominantními frekvencemi – pro starší trasu C se jedná o frekvence od 35 do 65 Hz, pro novější trasu B od 48 do 80 Hz. Zřejmě má konstrukce tunelové roury a kolejového svršku dominantní vliv na frekvenční charakter budicích frekvencí.

Při přenosu vibrací z hlubokých tras metra k povrchu terénu dochází zpravidla ke snížení amplitudové úrovně buzení. Tak např. před stavbou hotelu Hilton v Praze bylo provedeno měření vibrací na úrovni povrchu obezdívky mezistaniční tunelové trasy a také na volném nezastavěném povrchu terénu na zkušebním základu. Příklad frekvenčních spekter naměřených vertikálních vibrací je na uveden na obr.6. Z porovnání úrovně odezvy na tunelové konstrukci metra a na volném povrchu na terénu je zřejmé, že frekvenční složení budicího signálu při průchodu geologickým prostředím se mění v závislosti na mocnosti vrstev, vzdálenosti od zdroje ap. V naměřeném spektru z měření na zkušebním základu se promítnou i frekvence uložení tohoto základu na povrchu terénu.




Obr.6 FFT spektrum naměřených vibrací na volném povrchu a na konstrukci stropu tunelu metra na trase C

Při porovnání účinků jízdy vlaků metra na nových trasách na velikost vybuzených vibrací, má zastavení vlaku ve stanici za důsledek přibližně devítinásobné zesílení amplitud vibrací ve srovnání s hladkým průjezdem vlaku metra stanicí. Při sledování vibrací v kolejišti a na konstrukci tunelové roury nemusí být vždy vibrace v kolejišti větší než vibrace na nosné konstrukci tunelu nebo stanice; to závisí na spektru vlastních frekvencí příslušné tunelové

konstrukce (obdobně jako při přenosu vibrací z vozovky do blízkých objektů u silniční dopravy), jejichž důsledkem je, že vibrace z kolejiště mohou být na frekvencích, odpovídající vlastním frekvencím tunelu, zesíleny nebo zeslabeny. Obecně lze konstatovat, že efektivní vibrace (efektivní zrychlení vibrací) od pojezdu vlaků v metru jsou v pražských podmínkách na úrovni desetin $mm/s^2$, pokud se tyto vibrace šíří geologickým prostředím na větší vzdálenosti a z větších hloubek. Okamžité špičkové výkmity zrychlení vibrací se pohybují v jednotkách až desítkách $mm/s^2$. Dominantní frekvenční složky vibrací leží přibližně na frekvencích od 40 Hz výše. U konstrukcí základů budov, které spojuje se stavbami metra pevný kontakt, např. prostřednictvím železobetonu, proniklé betonové injektáže ze základů, skalní horniny, je zřejmý nárůst amplitud budicích vibrací proti uváděnému rozmezí.

Většina celkové energie z mělce uložených nebo na povrchu situovaných zdrojů (ať již dopravy nebo stacionárních zdrojů- základů strojů ap.) přenese do okolních konstrukcí jako povrchové vlnění terénu nebo různě hmotných vrstev podloží. Rozhodující podíl mají Rayleighovy povrchové vlny cca 67%, zbývajících 26% připadá na smykové vlnění a 7% na podélné vlnění. Díky povrchovému vlnění rozhoduje o přenosu vibrací do konstrukce způsob připojení jízdní dráhy k ohrožené budově zpevněným povrchem (vozovka, vybetonované povrchy) nebo nezpevněným povrchem (zatravněné plochy, zahrady).

## 4. Závěr

Cílem tohoto příspěvku bylo vzájemně porovnat vlivy povrchové a podpovrchové dopravy na stavební konstrukce v jejich blízkosti a dát informativní pohled na jejich amplitudovou a frekvenční charakteristiku, včetně případné modifikace těchto budicích vibrací odezvou konstrukce při jejich působení. Jedná se o velmi komplexní problematiku, na kterou v současnosti nelze dát vždy jednoznačnou odpověď bez podrobnějších analýz, protože jak charakter buzení, tak odezva konstrukce je závislá na řadě parametrů jak u zdroje, u ohrožené konstrukce, tak na cestě od zdroje k ohrožené konstrukci.

Z výše uvedeného a v souladu i se zkušenostmi ze zahraničí je nejvhodnější změřit úroveň vibrací ve zdroji nebo na cestě nebo na ohrožené konstrukci. V případě, že je konstrukce ve výstavbě, lze provést měření na jejích základech nebo v těsné blízkosti. Na měření navazuje posouzení odezvy ohrožené konstrukce, případně návrh opatření pro snížení vibrací celé konstrukce nebo její části.

Naměřené hodnoty odezvy nemusí být v jednotlivých lokalitách významně podobné, naopak se mohou od sebe i výrazně lišit. Hodnoty vibrací uvedené v příspěvku, lze tedy použít jako první přiblížení ke skutečným hodnotám na reálné konstrukci v konkrétních podmínkách.

## 5. Poděkování

Práce na této problematice byla podporována zčásti grantovým projektem GAČR No 103/06/1521 a dále projektem CZ.04.3.07/3.2.01.3/3323. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit svůj dík za podporu, jak grantové agentuře, tak Evropskému sociálnímu fondu, Magistrátu hlavního města Prahy a státnímu rozpočtu České republiky.

## 8. Literatura

Nařízení vlády č. 148/2006 ze dne 15.března 2006 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, 148/2006 Sb. (Nahrazuje Nařízení vlády č. 502/2000 ze dne 27.listopadu 2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, revize 2004.)

ČSN 73 1101 (1980) Navrhování zděných konstrukcí, ČNI, Praha.

ČSN 73 0040 (1996) Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva, ČNI Praha.

ČSN ISO 2631 (01 1405) (1999) Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím, Část 1: Všeobecné požadavky, Část 2: Nepřerušované vibrace a rázy v budovách (1 až 80 Hz), ČNI Praha, 1994, revize 1999.

ISO 4866 (1990) Mechanical vibration and shock – Vibrations of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.

ISO/DIS 14837-1.2:2004 Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General guidance.

Major, A. (1980) *Dynamics in Civil Engineering*. Akadémiai Kiadó, Budapest 1980.

Makovička, D., Král, J. (1990) Dynamické zatížení základových konstrukcí nově budovaných hotelů v Praze, působených provozem metra, *Pozemní stavby*, duben 1990.

Makovička, D. (1991) Structural analyses under technical seismic excitation. Krätzig, W. B. and All: Structural Dynamics, Balkema, Rotterdam.

Makovička, D., Makovička, D. Jr. (2004) Dynamic response of building from groundborne vibration loading, In: Engineering Mechanics 2004, Inst. of Thermomechanics, Ac. of Sci. of CR., Svratka, pp. 175-176 + 10 pp on CD.

Makovička, D., Makovička, D. ml. (2005): Izolace budov proti nadměrným vibracím od provozu metra, Stavební obzor, č.1, roč.14, s. 8-15.

Makovička, D., Makovička, D. ml. (2005): Zatížení stavebních konstrukcí vibracemi od povrchové a podpovrchové dopravy), Stavební obzor, č.9, roč.14, s. 261-269.

Makovička, D. & Makovička, D., Jr. (2005) Response analysis of a building loaded by technical seismicity propagating from a tube railway structure, *Earthquake Resistant Structures V*, ed. Brebbia, C.A.:, WIT Press, Southampton, pp. 675-684.

Makovička, D. & Makovička, D., Jr. (2007) Determination of seismic transport effects on buildings, *ERES 2007,* WIT Press, Southampton.

Osama Hunaidi (2000) Traffic vibrations in buildings, *National Research Council of Canada*, No. 39, June 2000.