

## Princip dynamického filtru pro snížení přenosu vibrací z podloží do konstrukce

*doc. Ing. Daniel MAKVIČKA, DrSc.*  
ČVUT – Kloknerův ústav  
Praha

*Ing. Daniel MAKVIČKA*  
Statika a dynamika konstrukcí  
Kutná Hora

Pro snížení přenosu vibrací z podloží do základových konstrukcí je výhodné provést na rozhraní obou prostředí dynamický filtr. Jeho principem je vytvoření vhodné vrstevnaté konstrukce, která umožní při průchodu vlnění tímto souvrstvím snížení intenzity vibrací. Vrstevnatá konstrukce je vyskládaná z vrstev s velkou a s velmi malou objemovou hmotností a také s vysokou a nízkou rychlostí šíření vlnění těmito vrstvami. Na příkladu konkrétní budovy je uveden princip návrhu dynamického filtru a ověření jeho účinnosti po dostavbě objektu na základě provedených měření vibrací od dopravy po přilehlé komunikaci.

### Úvod

Pro snížení přenosu vibrací do konstrukcí budov, které jsou bezprostředně ohroženy vibracemi od technické seizmicity [2], [3], působené např. účinky dopravy, odstřely v lo-mech, vibracemi od základů těžkých strojů s dynamickými účinky apod., bývá vhodné vybudovat ve směru k vozovce nebo jinému zdroji vibrací dynamický filtr. Je-li vytvořen vrstevnatou konstrukcí, může být proveden v odstupu několika metrů od budovy nebo navazovat na její základovou konstrukci. V půdorysu musí jako zastínění přesahovat rozměr objektu o několik metrů na obě strany.

Pro osazení svislého dynamického filtru lze zpravidla využít přesah stavební jámy ve srovnání s půdorysem základů konstrukce, v případě hotových konstrukcí je nutné provést výkop před čelní fasádou. Hloubka výkopu bývá do 1 m pod úroveň základové spáry domu. Pokud je hladina spodní vody nad úroveň založení, musí být výkop pro konstrukci filtru důsledně odvodněn, jinak jeho budování ztrácí smysl. Případně se dynamický filtr pro budovy s více podzemními podlažními, která jsou pod hladinou podzemní vody, navrhuje jen od povrchu terénu po přibližně úroveň hladiny podzemní vody tak, aby jeho účinnost byla zaměřena především na omezení přenosu povrchového vlnění.

Vrstevnatá konstrukce filtru, resp. její výrazně hmotné vrstvy, jsou navrhovány buď jako zděné ve dvou nebo více řadách (vrstvách), nebo jako železobetonové stěny tloušťky

minimálně 150 mm. Prostor mezi těmito výrazně hmotnými vrstvami stěn se vyplňuje lehkým porézním materiálem, alespoň stejné tloušťky. Na dno výkopu se ukládá drenážní potrubí pro odvod srážkové vody nebo snížení hladiny spodní vody. Voda proniká do konstrukce filtru musí mít možnost vytéci, proto by měla být konstrukce odvodněna. Povrch filtru se obvykle zakrývá asfaltovou fóliovou izolací, bránící zatékání vody shora. Překrýt ji lze tenkou (do 150 mm) zatraťnou plochou nebo betonovou dlažbou do pískového lože. Nevhodné je zabetonování až po obvodové stěny konstrukce nebo zakrytí keramickou dlažbou do podkladního betonu s výplní spár mezi dlažebními prvky na bázi cementů apod.

Využití dynamického filtru není omezeno jen pro svislé plochy, ale lze jej použít i pro vodorovné konstrukce v základové spáře. Skladba ve formě vrstevnaté konstrukce je obdobná jak pro svislý, tak vodorovný směr. Je však nutné posoudit únosnost jeho vrstev na zatížení budovou pro vodorovné filtry a zemním tlakem pro svislé filtry.

### Princip filtru

Princip je založen na snížení přenosu vibrací vrstvami s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi. Počet vrstev určuje efektivnost filtru. Zpravidla se používají konstrukce složené ze tří až pěti vrstev, přičemž jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou chráněny fólií, např. geotextilií, proti proražení. Dynamický filtr musí být chráněn proti zaplnění vodou, může tam voda natéci, ale musí mít možnost vytéci, proto by měl být budován nad hladinou spodní vody nebo odvodněn.

Princip dynamického filtru vychází z teorie šíření vlnění vrstevnatým prostředím s různým akustickým odporem. Jestliže použijeme pro vysvětlení teorie šíření vibrací v jednorozměrném prostředí [1], pak o efektivnosti dynamického filtru rozhoduje poměr procházejících tlaků (vlnění)  $p$  z prostředí  $a$  do prostředí  $b$ , tedy

$$p_b / p_a = 2 / [1 + (\rho_a \cdot c_a) / (\rho_b \cdot c_b)] = k_{a,b},$$

kde  $k_{a,b}$  je konstanta přenosu;

$\rho_a, \rho_b$  – objemová hmotnost prostředí (vrstvy)  $a, b$ ;

$c_a, c_b$  – rychlost šíření podélného vlnění v prostředí  $a, b$ ;

- $A_a = \rho_a \cdot c_a$  – akustický odpor prostředí  $a$ ;  
 $A_b = \rho_b \cdot c_b$  – akustický odpor prostředí  $b$ ;  
 $p_a$  – akustický tlak ve výchozím (počátečním) prostředí, např. v podloží;  
 $p_b$  – akustický tlak v prostředí  $b$  po průchodu rozhraním  $a/b$ .

Obecně průchodem vlnění  $n$  vrstevnatou konstrukcí dostaneme výsledný tlak

$$p_{\text{výsl}} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \text{až } k_n) \cdot p_a.$$

O účinnosti dynamického filtru tedy rozhoduje poměr akustických odporů prostředí  $A$  ve filtru prostrádaných. Pro informaci jsou charakteristiky vybraných materiálů možných vrstev prostředí uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Charakteristiky prostředí a jejich akustický odpor

Prostředí	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [10 <sup>3</sup> · m/s]	$A = \rho \cdot c$ [10 <sup>3</sup> · kg/m <sup>2</sup> s]
beton	2 500	2,80 (podle struktury)	7 000
zdivo	1 600	2,10 (podle struktury)	3 360
šterkopísky	1 800	0,60 (podle struktury)	1 080
perlit (ep 100)	90	0,90 (podle velikosti pórů)	81
heraklit	700	2,10 (podle zaplnění pórů cementem)	1 470
pryže	1 200	0,16 (přibližně)	192
vlhká hlína	1 700	1,50 (podle struktury)	2 550
polystyrén	35,3 až 50	0,70 až 0,90 (podle struktury)	25 až 45

Svislá konstrukce dynamického filtru může být navázána bezprostředně na obvodovou suterénní zeď - stěnu objektu. Filtr lze umístit před rubovou hydroizolací nebo za ní; v případě, že objekt rubovou hydroizolací chráněn není, je nutné zajistit druhotnou hydroizolaci. V městských aglomeracích lze filtr umístit na pažení základové jámy opatřené ztraceným bedněním na bázi pilot apod. I zde je nutno zajistit jeho ochranu z obou stran geotextilií a hydroizolací. Zbývající prostor mezi filtrem a stěnou objektu lze vyplnit zásypem zeminou nebo šterkopísky. Materiály s nižší objemovou hmotností jsou vhodnější. Pokud se použije šterkopísková směs, nesmějí ostré hrany kameniva poškodit hydroizolační vrstvu (to je důvod vkládání geotextilie).

Na kontaktu s povrchem je vhodné filtr zakrýt proti zatekání srážkové vody a ukončit betonovou dlažbou uloženou do písku nebo zakrýt zatravněnou vrstvou nezpevněné zeminy předzahrádky nebo minimálně pružným asfaltovým tmelem. Na trhu jsou standardně vyráběné materiály pro lehké porézní vrstvy filtru:

– expandovaný perlit je jemně pórovité kamenivo bílé barvy, vyráběné ve frakcích 0-0,2 a 0-4 mm. Má velkou izolační schopnost, jeho nevýhodou je značná nasákavost. Tvarované polyetylenové fóliové matrace, plněné expandovaným perlitem, se vyrábějí v rozměru 150 × 50 × 8 cm (pokrytá plocha je 0,75 m<sup>2</sup>). Jejich výhodou je, že perlit není při pokládce rozfoukáván větrem. V minulosti jej autoři použili pro návrh vodorovného filtru v základové spáře budovy nemocnice ležící nad tunelem metra (obr. 1). Filtr byl tvořen v pořadí odspoda nahoru betonovou deskou základové vany, perlitovými matracemi, na nich osazenými prefabrikovaný-

mi stropními deskami, znovu perlitovými matracemi a vrchní deskovou konstrukcí základové vany. Jednotlivé vrstvy byly odděleny asfaltovými izolačními pásy a geotextilií;

– pórovitá lehčená kameniva typu agloporit, keramzit, expandit a další jsou zpravidla vhodná svou pórovitou strukturou, nízkou objemovou hmotností a v porovnání s perlitem výraznější objemovou stálostí, ale vyšší hmotností přibližně 400-700 kg/m<sup>3</sup>;

– vhodné jsou též pórovité pryže s nízkou objemovou hmotností, polystyrény apod., které jsou zpravidla cenově dostupnější.

### Návrh filtru a jeho účinnost

Pro obytnou budovu v Praze, v těsné blízkosti Plzeňské ulice, byly navrhovány následující varianty skladby svislého dynamického filtru:



Obr. 1. Výstavba vodorovného dynamického filtru v základové spáře budovy v Praze 9

$a$  – pokládání geotextilie na perlitové matrace,  $b$  – napojení vodorovné a svislé konstrukce filtru, kladení asfaltových pásů hydroizolace

- železobetonová obvodová stěna podzemních podlaží objektu, bentonitová hydroizolace, extrudovaný polystyrén tloušťky 100 mm, ochranná geotextilie, štěrkopískový zásep, ztracené dřevěné pažení základové jámy;
- železobetonová stěna podzemních podlaží objektu, bentonitová hydroizolace, vibroizolační pryžová deska tloušťky 25 mm o dynamické tuhosti 50 MPa/m, ochranná geotextilie, štěrkopískový zásep, ztracené dřevěné pažení základové jámy;
- železobetonová stěna podzemních podlaží objektu, bentonitová hydroizolace, extrudovaný polystyrén tl. 30 mm, perlitová matrace tl. 80 mm, přízdívka z plných cihel tloušťky 100 mm, ochranná geotextilie, štěrkopískový zásep, ztracené dřevěné pažení základové jámy.

Z tabulky 2 vyplývá, že druhá varianta je nevýhodná, protože při ní dojde místo k poklesu procházejících vibrací přibližně k jejich nárůstu, odhadem dvojnásobně. Při použití první varianty dojde k poklesu prostupující energie přibližně na 16 %, při třetí variantě přibližně na 11 %. Projektant z těchto alternativních skladeb filtru vybral první variantu.

Tab. 2. Charakteristiky přenosu kvysl pro navržené konstrukční uspořádání dynamického filtru

Přestup mezi vrstvami	$k_i$	$k_{\text{vysl}} = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_i$
varianta 1		
štěrkopísek / polystyrén	0,08	0,16
polystyrén / beton	1,99	
varianta 2		
štěrkopísek / pryž	1,15	1,91
pryž / beton	1,65	
varianta 3		
štěrkopísek / zdivo	1,51	0,11
zdivo / perlit	0,05	
perlit / polystyrén	0,76	
polystyrén / beton	1,99	

Je nutné zdůraznit, že metodika výpočtu je pouze přibližná a využívá zjednodušení na jednorozměrné systémy. Zanedbává tloušťku vrstev a případné jejich imperfekce. Chyba se pohybuje okolo 30 %, ale může být i větší v závislosti na struktuře materiálu, velikosti pórů, vlhkosti, aktuálních charakteristikách prostředí apod. Při výpočtu byl zjednodušen průchod akustické energie hydroizolací, protože jde o tenké vrstvy s relativně nejasnými charakteristikami prostředí; provedení hydroizolace je však ve prospěch snížení přenosu vibrací.

### Ověřování účinnosti filtru

V době zkoušek byla budova po stavební stránce téměř dokončena, chybělo pouze dokončit dlažbu v některých chodbách, elektroinstalace ve vybraných podlažích a vodovodních a kanalizačních potrubních rozvodů. Co se týče rozdělení hmot v konstrukci, byl objekt prakticky dokončen včetně nosných i nenosných prvků. Budova nebyla obsazena, takže konstrukce budovy nebyla zatížena stálou složkou užitných zatížení. Od komunikace Plzeňské ulice byl

mezi obvodovou zdí budovy a chodníkem nezpevněný, dosud neupravený terén. Vrstvy dynamického filtru byly vytaženy nad povrch terénu a překryty geotextilií. Před vchodovými dveřmi byla vytvořena mělká bezpečnostní betonová ochranná stěna. Vlastní chodník v Plzeňské ulici končil přibližně na úrovni stavebního oplocení pozemku (obr. 2b).

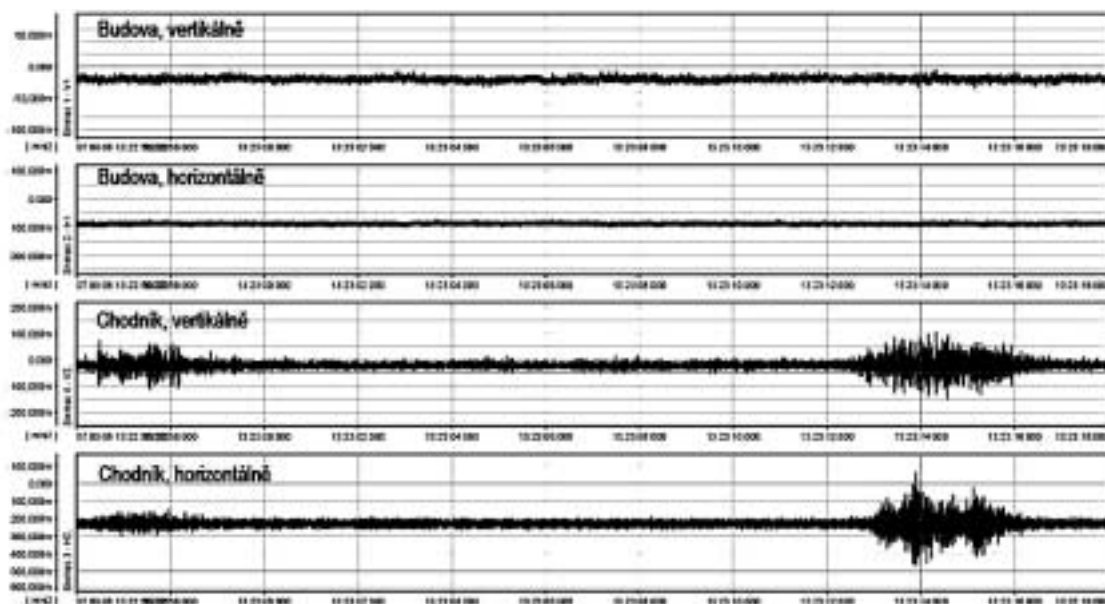
Pro měření vibrací od dopravy bylo vybráno podlaží na úrovni terénu Plzeňské ulice, a sice vstupní chodba (obr. 2a) a přilehlé byty, aby bylo možné měřit současně vibrace i na chodníku. Před měřením byly přerušeny dokončovací práce v objektu, aby vibrace od dopravy nebyly překryty vibracemi od drobných mechanismů (vrtaček, sbíječek apod.) uvnitř objektu.



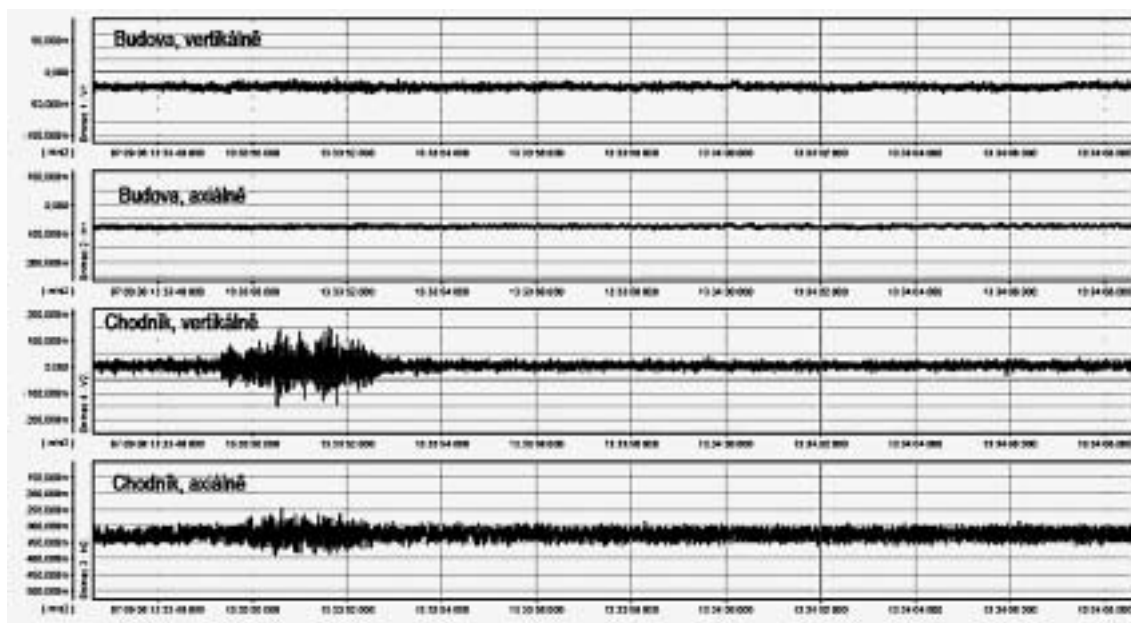
Obr. 2. Fotografie osazení měřicích kostek pro měření přenosu vibrací

a – ve vstupní chodbě budovy, b – na okraji chodníku Plzeňské ulice za ohrazením staveniště

Z hlediska přenosu z ulice do budovy je zajímavé porovnání vibrací ve zrychlení ve vstupní chodbě do budovy ze strany Plzeňské ulice, kryté keramickou dlažbou, a měřením na chodníku z podkladního betonu s horní vrstvou z litého asfaltu. Chodník je původní ve stáří několika desítek let se ztuhnutým podložením umožňujícím přenos vibrací z vozovky do konstrukce chodníku. Měřeno bylo v globálních směrech pohybu (vztaženo k ose kolejí tramvají, které jsou rovnoběžné s čelní fasádou budovy). Porovnání průběhu vi-



Obr. 3. Záznam z měření časových průběhů zrychlení při přejezdu dvou tramvajových souprav po Plzeňské ulici (na počátku přejezd tramvaje po vzdálenější koleji a na konci po bližší koleji vzhledem k měřené budově)  
... záznamy v chodbě budovy a na chodníku ve vertikálním a horizontálním příčném směru



Obr. 4. Záznam z měření časových průběhů zrychlení při přejezdu tramvajové soupravy po bližší koleji vzhledem k měřené budově)  
... záznamy v chodbě budovy a na chodníku ve vertikálním a horizontálním axiálním směru

brací je zřejmé z obr. 3 a obr. 4 a porovnání maximální úrovně výkmitů zrychlení vibrací v budově ve srovnání s chodníkem v tab. 3. Pro porovnání dynamických účinků tramvajové dopravy s jinými typy dopravy lze využít výsledky uvedené v [3]. Ze získaných výsledků vyplývají následující závěry:

a) dominantním zdrojem vibrací objektu je přejezd tramvajových souprav po Plzeňské ulici. Doprava po koleji bližší k objektu má větší účinek. Jednotlivé výchylky se mírně liší v závislosti na rychlosti přejezdu tramvaje a jejím obsazením cestujícími. Nicméně přenos vibrací od tramvajové dopravy do objektu je velmi malý, a zejména ve vyšších podlažích zaniká v šumu pozadí – přejezd tramvaje není z hle-

diska vibrační téměř nepozorovatelný. Přejezdy nákladních automobilů a autobusů jsou proti přejezdu tramvajových souprav výrazně nižší;

b) vliv dopravy se uvnitř objektu projevoval ve špičkových zrychleních vertikálně do 23 mm/s<sup>2</sup>, horizontálně (příčně a axiálně) do 16 mm/s<sup>2</sup>;

c) efektivnost dynamického filtru na rozhraní budovy a přilehlé komunikace, uvedenou v tab. 3, lze vyjádřit poměrem špičkových výkmitů zrychlení kmitání v příslušném směru při přejezdu tramvaje, naměřených na chodníku vedle objektu a v jeho vstupní chodbě. Tento poměr je v průměru pro vertikální směr 0,085, pro horizontální příčný směr 0,046 a pro axiální směr 0,135. Při návrhu filtru byla stanovena

přibližná hodnota účinnosti filtru 0,16 (varianta 1). Z výsledků měření je zřejmé, že tento poměr – snížení přenosu vibrací je ještě výhodnější 0,135 < 0,16. Pro vertikální směr a pro horizontální příčný směr je prostup vibrací z Plzeňské ulice do objektu ještě nižší. Na tom, zejména ve vertikálním směru, se podílejí nezpevněné pruhy terénu před domem (mezi chodníkem a budovou objektu);

d) chůze osob po chodbách objektu nebo v bytech vyvolávala vibrace několikanásobně vyšší, než se projevují vibrace od povrchové dopravy. Při poskocích na podlaže byly tyto vibrace řádově vyšší;

e) z hlediska posuzování vibrací bylo rozhodující kmitání velkých stropních desek ve vyšších podlažích budovy, jejichž vlastní frekvence jsou mezi 29-32 Hz v závislosti na rozpětí desek a jejich tloušťce. Na této frekvenční složce dosahují vibrace (efektivních) RMS hodnot zrychlení vertikálně do 2,1 mm/s<sup>2</sup>. V horizontálním směru je tato složka nižší přibližně do 1 mm/s<sup>2</sup>.

Tab. 3. Účinnost dynamického filtru při přejezdu tramvaje

Záznam číslo	Poměr maxim špičkových výkmitů zrychlení v budově a na chodníku		
	vertikálně	horizontálně příčně	horizontálně axiálně
1	0,114	0,058	–
2	0,09	0,037	–
3	0,083	0,044	–
4	0,078	–	0,087
5	0,079	–	0,148
6	0,087	–	0,172
8	0,06	–	0,133
průměr	0,085	0,046	0,135

## Závěr

Stavební konstrukce budov zpravidla zesílí vibrace, které se do budovy šíří základovým prostředím. Míra tohoto zesílení (popř. zeslabení) je závislá na blízkosti frekvenčních špiček spektra buzení, tedy účinků dopravy a vlastních frekvencí kmitání budovy.

Pro daný objekt bylo v etapě zahajování výstavby provedeno měření na ztraceném bednění základové jámy a na základové desce. Z těchto měření byl proveden odhad přenosu vibrací ze základového prostředí, resp. pažení základové jámy do vlastní konstrukce budovy. Výsledkem byl nárůst vibrací vlastní konstrukce budovy ve srovnání s pažením základové jámy přibližně na trojnásobek až pětinašobek. Tento nárůst bylo možné řešit buď před zahájením výstavby návrhem vhodného pružného založení budovy [3], nebo v etapě zahájených stavebních prací provedením dynamického filtru ze strany od komunikace. Rozhodnutí bylo učiněno ve prospěch dynamického filtru.

Pro správnou funkci dynamického filtru byla nutná důsledná kontrola jeho provádění; především musely být filtrem přerušeny veškeré tuhé spoje – mosty mezi pažením základové jámy a vlastní základovou konstrukcí, zaměřená zejména na kontrolu zásypu s vyloučením velkých valounů nebo kusů betonu, tuhého neizolovaného vstupu potrubí a ostatních vedení do objektu apod. Dále bylo pečlivě kon-

trolováno odvodnění vrstev filtru, měření přenosu vibrací mezi komunikací a budovou po dostavbě ukázalo, že tato cesta byla efektivní a vhodná.

**Práce na této problematice byla podporována projektem č. 103/08/0859 GA ČR „Odezva konstrukci při statických a dynamických zatíženích působených přírodní a lidskou činností“ s pokračováním podpory projektem č. 103/06/1521 GA ČR „Spolehlivost a rizika konstrukcí v extrémních podmínkách“.**

## Literatura

- [1] Koloušek, V. a kol.: Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami. Bratislava, SVTL 1967.
- [2] Makovička, D. – Makovička, D.: Response Analysis of Building Loaded by Groundborne Transient Vibration. In: III. European Conference on Computational Mechanics, Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering. National Laboratory of Civil Engineering, Dordrecht, Springer 2006, p. 748 + 11 pp on CD.
- [3] Makovička, D. – Makovička, D.: Determination of Seismic Transport Effects on Buildings. In: Brebbia, C. A.: Earthquake Resistant Engineering Structures VI. Southampton, WIT Press 2007, pp. 353-362.

**Makovička, D. – Makovička, D. jr.: Principle of the Dynamic Filter for the Reduction of Vibrations Transfer from the Subsoil to the Structure**

In order to decrease vibrations transfer from the subsoil to the foundation structures, it is advisable to create a dynamic filter at the boundary of both systems. It is based on the generation of a suitable layered structure which will facilitate the reduction of the intensity of vibrations during the passage through this formation. The layered structure is composed of layers with a high and very low bulk density and also a high and low speed of vibrations propagation through these strata. The principle of the design of the dynamic filter and the verification of its efficacy is shown in the example of a specific building after the construction completion based on measurements of vibrations from traffic along the adjacent road.

**Makovička, D. – Makovička, D. jr.: Das Prinzip eines dynamischen Filters zur Reduzierung der Übertragung von Vibrationen aus dem Untergrund in die Konstruktion**

Zur Reduzierung der Übertragung von Vibrationen aus dem Untergrund in Fundamentkonstruktionen ist es vorteilhaft, an der Schnittstelle beider Milieus einen dynamischen Filter auszuführen. Dessen Prinzip ist die Ausbildung einer Schichtenkonstruktion, die beim Durchgang der Schwingungen durch dieses Schichtensystem eine Reduzierung der Intensität der Vibrationen ermöglicht. Die Schichtenkonstruktion wird aus Schichten mit großer und mit sehr geringer Dichte und auch mit sehr großer und sehr geringer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingungen durch diese Schichten aufgebaut. Am Beispiel eines konkreten Gebäudes werden das Prinzip des Entwurfs eines dynamischen Filters und die Erprobung seiner Wirksamkeit nach der Fertigstellung des Objektes aufgrund durchgeführter Messungen der Vibrationen aus dem Verkehr auf der anliegenden Straße angeführt.