## SEIZMICKÁ ODEZVA TRHACÍ PRÁCE NA RAŽENÝCH TUNELECH STAVBY 514 LAHOVICE – SLIVENEC

### Martin Stolárik<sup>1</sup>

#### Seismic response of the blasting work in the dig tunnels on the work 514 Lahovice - Slivenec

This contribution deals with presentation of results from experimental seismological measurements of the dynamic response of blasting operation in shallow road tunnel (Civil Engineering Project 514 Lahovice – Slivenec, Praha). New Austrian Tunneling Method was used to design the tunnel. Differences between vibration attenuation curve from mathematical model (mathematical model was prepared using Plaxis 2D) and in-situ seismic measurement were main reason for experimental measurement. This experiment was focused on the influence of sensor seating in the tunnel floor in small distances, i.e. first tens of meters. Analysis of recorded wave patterns in the amplitude and frequency domains is presented in the paper.

#### Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá prezentací výsledků z experimentálních seismologických měření dynamické odezvy trhacích prací v mělce raženém silničním tunelu (stavební projekt 514 Lahovice – Slivenec, Praha). K výstavbě tunelu byla použita Nová rakouská tunelovací metoda. Rozdíly mezi křivkami útlumu vibrací z matematického modelu (matematický model byl vytvořen s použitím programového systému Plaxis 2D) a in-situ seismickým měřením byly hlavním důvodem pro další experimentální měření. Tento experiment byl zaměřen na vliv usazení senzoru seizmické aparatury na počvě tunelu a to v blízké zóně, tj. první desítky metrů. V příspěvku jsou publikovány analýzy zaznamenaných vlnových obrazů a to jak v amplitudové tak i frekvenční oblasti.

#### Klíčová slova

seismologická měření, vlnový obraz, amplitudová oblast, frekvenční oblast

# 1. Úvod

Tento příspěvek se bude zabývat experimentálním seizmickým měřením, které bylo realizováno v průběhu ražby silničních tunelů stavby 514 Lahovice – Slivenec. Obecně nejsou dána žádná kritéria ani doporučení pro umístění a usazení senzoru seizmické aparatury mimo stavební objekt či přímo v raženém tunelu, kde je trhací práce zdrojem technické seizmicity. Běžně se během výstavby tunelů provádí seizmický monitoring na vybraných objektech na povrchu, které se nacházejí v možném dosahu vlivu odezvy prováděné trhací práce. Ve sledovaných objektech se senzor seizmické aparatury umísťuje na tzv. referenční stanoviště, což je buďto nejnižší podlaží, nebo základ objektu (ČSN 73 0040). Z toho plyne, že senzor je povětšinou umístěn na rovné betonové podlaze.

### 2. Charakteristika stavby

Experimentální měření probíhalo na tunelech, které jsou součástí stavby 514 Lahovice – Slivenec, která je součástí tzv. "pražského" nebo také vnějšího městského okruhu (*www.dalnice-silnice.cz*). Cílem výstavby tohoto okruhu je propojit všechny dálnice a rychlostní komunikace u hlavního města a umožnit tak tranzitní dopravě plynulý a rychlý přechod mezi jednotlivými trasami rozbíhajícími se radiálně z Prahy (Obr. 1) (Hudek a Chmelař, 2004).

Trasa jižní části vnějšího okruhu od Lahovic ke Slivenci bude procházet od km 11,788 do km 13,417 dvěma jednosměrnými tunelovými troubami. Levá tunelová trouba dlouhá 1619,5 m bude dvoupruhá, pojížděná od Slivence v klesání cca 4 %. Pravá tunelová trouba, dlouhá 1660,3 m, pojížděná od Lahovic ve stoupání vyžaduje s ohledem na sklon cca 4 % rozšíření o stoupací pruh a je proto třípruhová. Obě tunelové trouby jsou z bezpečnostních a technologických důvodů propojeny sedmi propojkami ve vzdálenostech po cca 200 m.



Obr. 1: Situace vnějšího městského okruhu (www.d2-consult.cz)

Ražené objekty SO 601 (ražený dvoupruhový tunel), SO 602 (ražený třípruhový tunel) a SO 603 (Ražené tunelové propojky) tvoří podstatnou část stavby 514 silničního okruhu kolem Prahy. Z obou stran na ně navazují hloubené úseky tunelových trub (SO 605 až 608), které společně tvoří provozně jeden tunel se dvěma tunelovými troubami (Obr. 2).



Obr. 2: Portály tunelů ve směru od Slivence

S ohledem na dosah a optimální využití mechanizmů bylo navrženo razit tunelové trouby v celé délce s členěním výrubu na kalotu (přístropí) a jádro (opěří). Uzavírání ostění spodní klenbou se předpokládá v úsecích obou ražených portálů.

Ražené tunelové trouby byly raženy v ordovických a silurských horninách, které jsou tektonicky porušené a prostoupené zlomovými a vrásovými poruchami. Jedná se především o vápnité břidlice, doplněné četnými vložkami vápenců a posléze i bazaltové tufy. Druhá polovina ražeb probíhala střídavě v břidlicích, pískovcích případně tufech.

### 3. Experimentální měření I

První experimentální měření bylo realizováno ve vzdálenosti 102 m v třípruhové tunelové troubě při provádění trhací práce na jádře. Ražba v tomto místě prochází kosovským souvrstvím tvořeným jílovitými a jílovitopísčitými břidlicemi ve střídání s křemennými pískovci a prachovci. Nadloží je v tomto úseku ražby mocné 50 - 57 m. Hornina je bez stop alterace, zbarvení horniny je původní, rovnoměrné a výrub je zcela suchý. Hustota diskontinuit je zde velká (D4 – vzdálenost diskontinuit 60 – 200 mm). Tektonické poruchy se zde nevyskytují.



Obr. 3: Vlnový záznam a frekvenční obraz měření ve vzdálenosti 102 m

Maximální amplituda na svislé složce je 1,57 mm.s<sup>-1</sup>, na složce vodorovné směrem k čelbě 1,26 mm.s<sup>-1</sup> a vodorovné rovnoběžně s čelbou 0,75 mm.s<sup>-1</sup>. Frekvenční rozsah záznamu je od 20 Hz do 120 Hz se dvěma píky na 50 Hz a 110 Hz (pík 50 Hz – projev uzemnění elektrické sítě). (Obr. 3 – Osy: vlnový záznam – svislá [count], vodorovná [s], frekvenční obraz – svislá [s], vodorovná [Hz], platí i dále) Získané hodnoty maximálních amplitud rychlosti kmitání a frekvenční rozsah zaznamenaného jevu byl použit jako součást vstupů do matematického modelu.

### 4. Experimentální měření II

Druhé experimentální měření bylo opět realizováno v třípruhové tunelové troubě ovšem v blízké zóně. Měření bylo prováděno seizmickými aparaturami s třísložkovým senzorem LE-3D (vzorkovací frekvence digitálního záznamu 500 Hz) ve vzdálenosti od čelby

26,7 m, LE-3D (500 Hz) ve vzdálenosti 37,2 m (tento senzor vypadl z registrace), ViGeo 2 (500 Hz) ve vzdálenosti 47,4 m, ViGeo 2 (250 Hz) ve vzdálenosti 57,2 m a LE3D (250 Hz) ve vzdálenosti 74,7 m usazenými na počvě třípruhového tubusu. Počva byla v místě měření pouze částečně seškrábnutá a zbytky rubaniny byly částečně zhutněny pojezdem těžké kolové nákladní techniky používané pro odtěžení rubaniny. Výsledky experimentálního měření byly vyhodnoceny jak v amplitudové oblasti (Obr. 4 – 7), tak také v oblasti frekvenční (Obr. 8 – 11).



Obr. 6: Vlnový záznam – vzdálenost 57,2 m

Obr. 7: Vlnový záznam – vzdálenost 74,7 m



Obr. 10: Frekvenční obraz – 57,2 m

Obr. 11: Frekvenční obraz – 74,7 m

Vlnové obrazy mají typický charakter seizmického projevu časovaných odstřelů. Na všech čtyřech záznamech je zřetelně vidět výrazný nástup každého časového stupně a následné utlumení. Doba trvání celého záznamu je 7 sekund. Maximální amplitudy rychlosti kmitání se pohybovaly v rozmezí od 1,36 mm.s<sup>-1</sup> do 3,83 mm.s<sup>-1</sup> a převládající frekvenční rozsah byl 30 – 100 Hz. Na záznamech pořízených senzory ve vzdálenosti 26,7 m a 47,4 m je patrný vliv přitížení senzoru kamenem pro zlepšení kontaktu senzoru s podložím.

### 5. Matematický model

Matematický model byl realizován programovým systémem Plaxis 2D. Cílem bylo namodelovat útlumovou křivku v horninovém masivu, v kterém docházelo k realizaci trhacích prací. Geometrie modelu, zjednodušená proti realitě v podélném řezu tunelu (Obr. 12) a parametry hornin (Tab. 1) byly zaimplementovány na základě geologického průzkumu prováděného při ražbě průzkumné štoly (Závěrečná zpráva o geologické dokumentaci a geotechnickém monitoringu v průzkumné štole "Lahovská").



Obr. 12: Geometrie matematického modelu

#### Tab. 1: Parametry hornin (γ- objemová tíha zeminy, μ- Poissonovo číslo, E – modul pružnosti, c – soudržnost, φ- úhel vnitřního tření)

Identifikace	γ [kN.m <sup>-3</sup> ]	μ [-]	E [kN.m <sup>-2</sup> ]	c [kN.m <sup>-2</sup> ]	φ [ <sup>°</sup> ]
Neupravená počva	26	0,15	60000	2	30
Kosovské souvrství	26	0,15	1100000	100	35

Vlastní dynamické zatížení simulující trhací práci bylo do modelu zavedeno na základě reálného záznamu průběhu rychlosti kmitání a frekvenční analýze, pořízených při experimentálním seizmickém měření I. Tato metodika zadání dynamického zatížení byla ověřena již realizovanými modely a byla již dříve detailně popsána (Stolárik, 2007; Stolárik, 2008). Zásadní výsledek, zohledňující výstupy matematického modelu i výsledky experimentálního měření I a II v tunelu lze prezentovat pomocí grafů. (Obr. 13, 14)



br. 13: Závislost maximální amplitudy rychlosti kmitání na vzdálenosti od zdroje dynamického zatížení – svislá složka

Obr. 14: Závislost maximální amplitudy rychlosti kmitání na vzdálenosti od zdroje dynamického zatížení – vodorovná složka směrem k čelbě

Jak ukazuje obr. 13 pro svislý směr, resp. obr. 14 pro směr vodorovný ve směru ke zdroji dynamického zatížení, hodnoty naměřené v blízké zóně nekorelují s hodnotami získanými z matematického modelu. Chyba pro svislou složku dosahuje až 86% a pro vodorovnou 59%. Jedno z možných vysvětlení rozdílných hodnot z experimentálního měření a matematického modelu je nesprávně naměřená hodnota.

### 6. Experimentální měření III

Cílem tohoto třetího experimentálního měření bylo poukázat na rozdílné výsledky měření seizmické odezvy trhací práce při různém usazení senzoru na počvě. Měření probíhalo v dvoupruhové tunelové troubě při provádění trhací práce na kalotě Experimentální měření bylo prováděno se stejným technickým vybavení jako měření předchozí. Ve vzdálenosti 62 metrů od čelby byly umístěny 4 senzory (A, B, C, D) v řadě vedle sebe rovnoběžně s čelbou.

Usazení senzorů A – D:

- senzor A volně stojící na povrchu počvy a přitížený kamenem zhruba krychlového tvaru, bez kontaktu s počvou;
- senzor B zcela zakopán v počvě a zasypán rubaninou;
- senzor C částečně zakopán v počvě, nezasypán a přitížen kamenem oválného tvaru, který měl kontakt s počvou a byl situován delší stranou rovnoběžně se směrem tunelové trouby;
- senzor D volně stojící na povrchu počvy, nepřitížený.

Na záznamech pořízených senzorem B (Obr. 15) resp. D (Obr. 16) není vidět žádný vnější vliv, kromě samotného projevu trhací práce a je jasně čitelné rozčasování celé nálože na jednotlivé časové stupně (zálomem počínaje a obrysem konče). Maximální amplitudy rychlosti kmitání u senzoru B jsou na všech třech složkách vyšší než u senzoru D (Tab. 2), což je způsobeno lepším přenosem vibrační energie mezi senzorem a horninou (senzor B byl zasypán, tedy celým povrchem v kontaktu s horninou). Výrazný rozdíl maximální amplitudy rychlosti kmitání na vodorovné složce rovnoběžné s čelbou je pravděpodobně dán vlivem nestejnorodosti horninového materiálu počvy.



Obr. 15: Vlnový záznam – senzor B

#### Obr. 16: Vlnový záznam – senzor D

U záznamu, který byl pořízen senzorem A (Obr. 17) lze na vlnovém obrazu svislé složky vidět výrazný vliv přitížení kamenem, kámen "poskočil". Obdobně tomu je i u záznamu C (Obr. 18) (zde již není zcela zřetelně vidět jednotlivé časové stupně prováděné trhací práce), kde lze na všech třech složkách vysledovat vliv rezonujícího kamene. Nejvýraznější je tento vliv na složce směrem k čelbě, kdy rovnoběžně s touto složkou byla situována i delší strana kamene, který byl před senzorem směrem k čelbě v kontaktu s počvou. Jedná se pravděpodobně i o projev tlakové vlny.



Obr. 17: Vlnový záznam – senzor A

Obr. 18: Vlnový záznam – senzor C

	Maximální amplituda rychlosti kmitání [mm.s <sup>-1</sup> ]				
	Svislá složka	Vodorovná složka směrem k čelbě	Vodorovná složka rovnoběžně s čelbou		
Senzor I	3,87	2,38	1,79		
Senzor II	4,46	2,98	3,57		
Senzor III	1,96	3,27	1,73		
Senzor IV	3,57	2,38	1,64		

Tab. 2: Maximální amplitudy rychlosti kmitání

Frekvenční rozsah záznamů trhací práce u všech čtyř senzorů je v rozmezí od 20 Hz do cca 100 Hz (Obr. 19 – 22). Obdobně jako u vlnových záznamů je i u frekvenční obrazů možno pro senzor A, resp. C vysledovat projev přitížení kamenem, který se zde projevuje nižší frekvencí kolem 2 Hz. Z důvodů frekvenčního rozsahu senzoru však nejsou píky zřetelné a úplné. U senzoru A je projev nejvýraznější opět pro svislou složku a u senzoru C na všech třech složkách. Ve všech čtyřech spektrech můžeme vysledovat pík na 50 Hz, což je projev uzemnění elektrické sítě.



Ηz

Ηz

Obr. 21: Frekvenční obraz – senzor C

## 7. Závěr

Seizmická měření jsou obvykle používána k hodnocení zatížení stavebních objektů na povrchu technickou seizmicitou vyvolanou trhacími pracemi a jejich dynamické odezvy např. (Erdik, 2001, Wasti and Ozcebe, 2001, Janotka, 2006). Základní informace pro tato hodnocení jsou odvozeny z matematických modelů a seizmických měření. Výsledky ze seizmických měření jsou obecně považovány za přesné hodnoty. Ovšem senzory umístěné v malých vzdálenostech od zdroje dynamického zatížení jsou ovlivněny mnohými nedefinovatelnými faktory, především tlakovou vlnou, impedancí mezi zemí a senzorem a usazením resp. ukotvením senzoru. Tyto faktory jsou pravděpodobně příčinou rozdílných výsledků mezi experimentálním měřením II a výstupy matematického modelu, což potvrzuje experimentální měření III se čtyřmi různě usazenými senzory umístěnými ve stejné vzdálenosti od zdroje dynamického zatížení. Pokud není možno senzor důkladně připevnit k podkladu, je lepší jej nechat volně stát. Pokud to podklad umožňuje, je vhodné senzor celý nebo alespoň částečně zahloubit, což na rozdíl od libovolného přitížení nemá žádný vliv na průběh záznamu. Rozdíly mohou být při odečtu maximální amplitudy, zahloubený senzor bude vykazovat maximální amplitudy vyšší, resp. při stanovení frekvenčního obsahu záznamu, zakopaný senzor bude registrovat do vyšších frekvencí.

Příspěvek je součástí disertační práce Studium seizmických projevů v okolí ražby mělkých podzemních děl. Školitelem je Doc. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. Příspěvek byl zpracován za finanční podpory GAČR 105/09/1415 "Studium seizmických projevů trhacích prací a dalších vibrací v blízké zóně vyvolaných při ražbě mělkých podzemních děl".

#### Literatura

ČSN 73 0040 – Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva

- ERDIK, M., CELEBI, M., MIHAILOV, V. and APAYDIN, N.: Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures., NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 2001, 603 pages.
- HUDEK, J. a CHMELAŘ, R.: Od Pražské podpovrchové tramvaje k tunelům Slivenec, *Tunel*, 3, Praha 2004, p.26–39.
- JANOTKA, V., VISKUP, J., PANDULA, B. and LEŠŠO.I.: Soil Profiles and Seismic Loading, Metalurgija, Vol. 45, No. 2 (2006), p. 127–130.
- STOLÁRIK, M.: Problematika modelování dynamického zatížení v programovém systému Plaxis 2D, *Ph.D. Workshop 2007 Proceedings*, (R.Blaheta, A.Kolcun eds.), IG AS CR, Ostrava 2007, p.63–68.
- STOLÁRIK, M.: Matematické modelování dynamických účinků trhacích prací programovým systémem Plaxis 2D, *Ph.D. Workshop 2008 Proceedings*, (R.Blaheta, A.Kolcun eds.), IG AS CR, Ostrava 2008, p.60–64.
- URBANOVÁ L.: Závěrečná zpráva o geologické dokumentaci a geotechnickém monitoringu v průzkumné štole "Lahovská", Stavební geologie GEOTECHNIKA, a.s, Praha 2005, 114 stran.

WASTI, S.T. and OZCEBE, G.– eds.: *Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Building*. NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 546 pages. <u>http://www.dalnice-silnice.cz/</u>

http://www.d2-consult.cz/

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Autor:

Ing. Martin Stolárik – Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba též VŠB-Technická univerzita Ostrava, FAST, L. Podéště 1875, 708 33 Ostrava-Poruba, tel. 00 420 596 979 242, stolarik.martin@seznam.cz