

Martin STOLÁRIK<sup>1</sup>

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SEIZMICKÝCH ÚČINKŮ TRHACÍCH PRACÍ  
PROVÁDĚNÝCH BĚHEM VÝSTAVBY TUNELU KLIMKOVICE  
MATHEMATICAL MODELING OF SEISMIC EFFECTS OF BLASTS PERFORMED  
DURING CONSTRUCTION OF KLIMKOVICE TUNNEL

**Abstract**

This paper summarized results of mathematical modeling of seismic effects of blasts performed during construction of Klimkovice tunnel. Program package Plaxis was used for this purpose. The main study was concentrate on seismic loading of building in near zone.

**Key words:** Klimkovice tunnel, mathematical modeling, seismic loading

**Úvod**

V České republice dochází k velkému rozmachu tunelové výstavby a podzemních děl obecně, což sebou nese i určité problémy, neboť mnoho již budovaných či plánovaných staveb je vedeno v zastavěných oblastech a v relativně malých hloubkách pod povrchem. Většina tunelů je ražena novou rakouskou tunelovací metodou, jejíž nedílnou součástí je rozpojování horniny trhacími pracemi a průběžný geotechnický monitoring, do něž spadá i monitoring seizmický. Trhací práce jsou zdrojem technické seizmicity, která může na povrchu způsobovat poškození zařízení budov či celých objektů. Seizmický monitoring v průběhu výstavby podzemního díla má tomuto zabránit. Na základě naměřených údajů jsou parametry trhacích prací upravovány tak, aby se minimalizovaly dopady ražby mělce vedeného podzemního díla na povrchu (Holub, 2006, Kaláb, 2007, Stolárik, 2007).

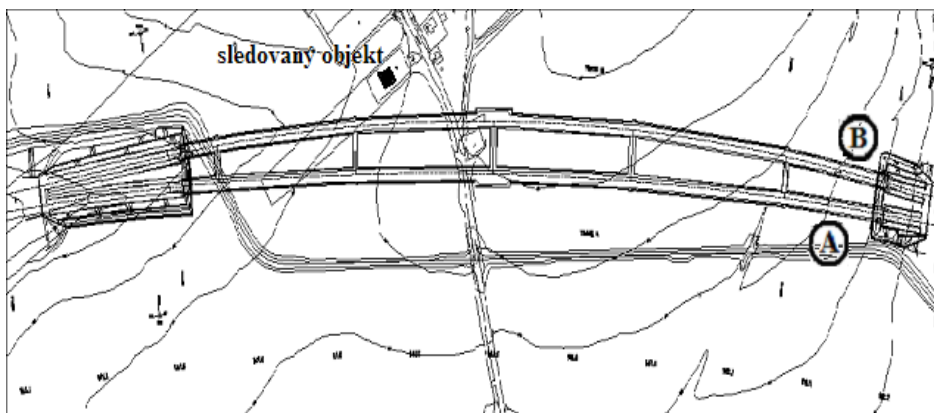
Cílem této práce je modelovat vliv lokální geologie a vzdálenosti na maximální hodnoty amplitudy rychlosti kmitání, při srovnání reálných naměřených hodnot a hodnot získaných z matematického modelu. Jako zdroj technické seizmicity byla v modelu uvažována trhací práce prováděná při ražbě mělce pod povrchem vedené tunelové trouby. Výsledky matematického modelu byly statisticky vyhodnoceny a porovnány s reálnými hodnotami rychlosti kmitání získanými během geotechnického monitoringu (Manuál programu PLAXIS 2D).

**Reálná předloha modelu**

Jako předloha pro zpracování matematického modelu byla použita stavba dálničního tunelu Klimkovice, který je součástí stavby dálnice D47. Jedná se o dvě jednosměrné dvoupruhové tunelové trouby (Obr. 1). Ražená část tunelu A je dlouhá 857.40 m, tunel B je ražený v délce 867.90 m. Hrubý profil obou ražených tunelů je 116.4 m<sup>2</sup> (bližší informace o tunelu Klimkovice včetně inženýrsko – geologických poměrů např. Stolárik 2007). V průběhu celé výstavby tunelu byl prováděn seizmický monitoring technické seizmicity vyvolané trhacími pracemi a senzory byly umístěny mimo jiné i na objektu rodinného domku č.p. 798 (interní materiály firmy INSET).

---

<sup>1</sup> Ing., FAST VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17.listopadu 15, 708 00 Ostrava-Poruba, (též Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Ostrava), martin.stolarik@vsb.cz



**Obr. 1** Tunel Klimkovice – situační schéma

### **Matematický model**

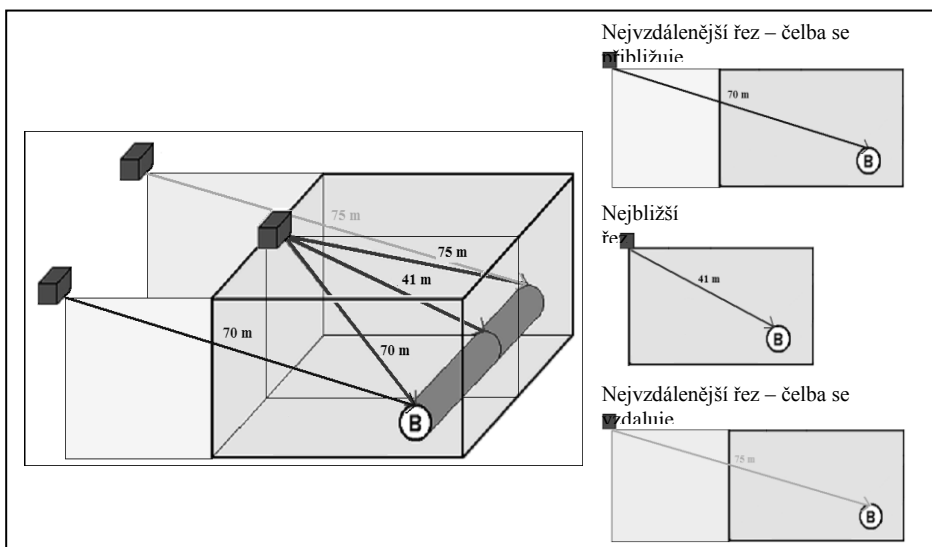
Dynamický model seizmických účinků trhací práce byl realizován v programovém systému Plaxis 2D osově symetrickým modelem. Při tvorbě dynamického modelu je obecný postup analogický jako v případě statické analýzy. Zahrnuje zadání geometrie modelu, definování okrajových podmínek, generaci sítě, zadání počátečních podmínek, zadání vstupních geometrických i materiálových charakteristik horninového prostředí i konstrukčních prvků a stanovení charakteristik zatížení (Hrubešová a Aldorf, 2004).

Pro potřeby 2D prostředí programového systému PLAXIS bylo nutné reálnou 3D situaci sledovaného 120 metrového úseku ražby tunelové trouby B patřičně zjednodušit, a to rozložením celé situace na 19 řezů odpovídajících staničením, ve kterých byly prováděny trhací práce (Obr. 2). Celkem bylo tedy sestaveno 19 matematických modelů simulujících postup čelby.

Vrstevnaté horninové prostředí odpovídá charakteristické geologii pro dané území a pro potřeby modelu bylo zjednodušeno. Jednotlivé vrstvy, které měly různý úklon a v geologickém řezu měnící se mocnost, byly do modelu zaimplementovány jako vrstvy vodorovné o stejné mocnosti (Obr. 3). Fyzikální vlastnosti zemin a mocnosti jednotlivých vrstev byly do modelu zadány na základě výsledků inženýrsko - geologického průzkumu (interní materiály firmy INSET) a doplněny tabulkovými hodnotami (ČSN 73 1001 – Zakládání staveb, Základová půda pod plošnými základy) (Tab. 1). Vliv podzemní vody nebyl z důvodu zjednodušení matematického výpočtu uvažován, model však bez zadání objemové tíhy saturované zeminy nepracuje.

**Tab. 1** Vlastnosti horninového prostředí

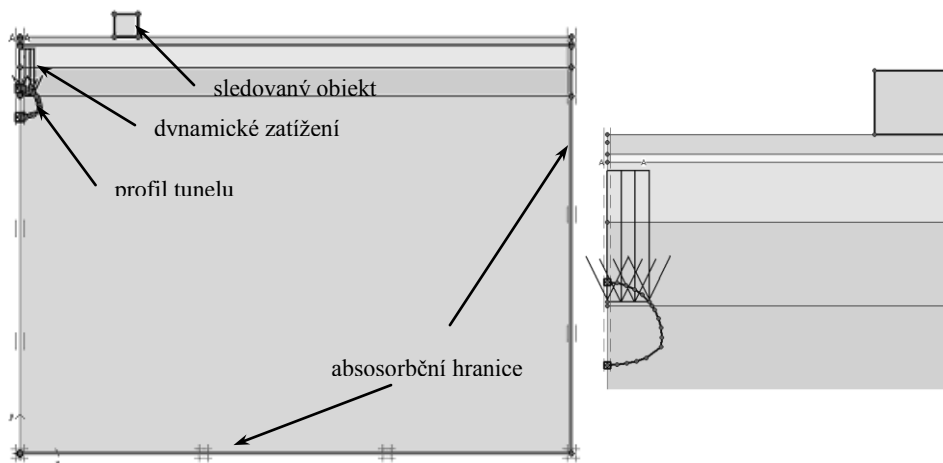
Typ horniny	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{SAT}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\Phi$ [°]	$\gamma$ ... objemová tíha zeminy
kvartérní pokryv	18	21	0,35	2000	10	19	
droby	22,65	24,65	0,25	2000000	80	42	$\gamma_{SAT}$ ... obj. tíha saturované zeminy
jílovce a prachovce	zvětralé	22,55	0,25	1500000	20	36	
	slabě navětralé	22,7	24,7	0,25	2000000	60	$\mu$ ... Poissonovo číslo
	neporušené	24,3	26,3	0,25	2800000	80	



**Obr. 2** Princip zjednodušení reálné situace pro potřeby 2D modelu

V případě modelování dynamických vlivů je nutno kromě základních charakteristik horninového prostředí (přetvárné, pevnostní, popisné parametry) zadat dále rychlosti šíření vln v horninovém prostředí, a charakteristiky materiálového tlumení. Rychlosti šíření vln lze buď zadávat přímo nebo je možno tyto parametry spočítat na základě modulu pružnosti E resp. Eoed, Poissonova čísla  $\mu$  a objemové tíhy  $\gamma$  dle obecně známých vztahů.

Pro zohlednění materiálového tlumení je nutno zadat tzv. Rayleighovy parametry tlumení alfa a beta. Pro osově symetrický model je často dostačující uvažovat pouze tzv. geometrické tlumení, plynoucí z radiálního šíření vln prostředím a materiálové tlumení lze v tomto případě zanedbat (Rayleighovy koeficienty tlumení jsou nulové) (Hrubešová a Aldorf, 2004).



**Obr. 3** Celková geometrie symetrického modelu a detail umístění zatížení a sledovaného objektu

Dynamický modul jímž je zadáno do matematického modelu dynamické zatížení je v programovém systému PLAXIS 2D charakterizován koeficientem dynamického zatížení (Amplitude multiplier), frekvencí kmitání a fázovým posunem (Obr. 4).

Fázový posun v této úloze nebyl uvažován, protože zavedení fázového posunu nemá vliv na výpočet. Koeficient dynamického zatížení byl spočítán za použití vztahu profesorky Fotieové (Bulyčev, 1988), přičemž parametry horniny vstupující do výpočtu  $p_{dyn}$  jsou parametry horninové vrstvy v modelu, ve které je umístěno dynamické zatížení:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2\pi} \cdot Kc \cdot \gamma \cdot Vp \cdot To \approx 1,8389 \quad [kPa] \quad (1)$$

kde

$Kc$  – koeficient seizmicity ( $Kc = 0,05$ )

$\gamma$  – objemová tíha zeminy ( $\gamma = 22,7 \text{ kN/m}^3$ )

$To$  – převládající perioda seizmických kmitů horninových částic ( $To = 0,01 \text{ s}$ )

$Vp$  – rychlost šíření podélných vln ( $Vp = 1018 \text{ m.s}^{-1}$ ) je dána vztahem (2):

(2)

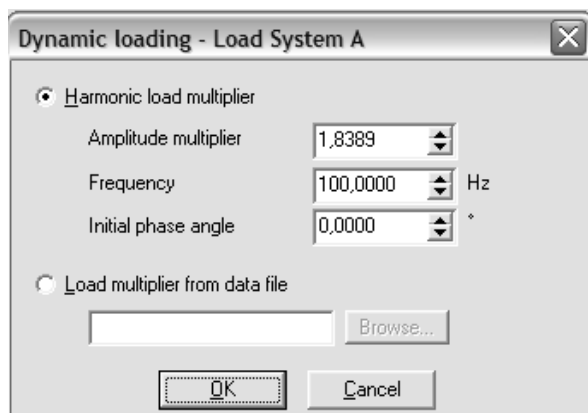
$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}, \quad E_{oed} = \frac{(-\mu)E}{(+\mu) \cdot (-2\mu)}, \quad \rho = \frac{\gamma}{g}$$

$E$  – modul pružnosti ( $E = 2000000 \text{ kPa}$ )

$\mu$  – Poissonovo číslo ( $\mu = 0,25$ )

$g$  – tíhové zrychlení ( $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$ )

$\rho$  – hustota horniny ( $\rho = 2,314 \text{ g/m}^3$ )



**Obr. 4** Dynamické zatížení – Plaxis 2D

Frekvence kmitání byla do matematického modelu zavedena z reálného záznamu průběhu rychlosti kmitání pořízeném při monitoringu technické seizmicity na objektu rodinného domku č.p. 798 vlivem trhacích prací prováděných v místě kaloty na tunelové troubě B v době, kdy ražba procházela v nejmenší vzdálenosti od monitorovaného objektu, tj. ve staničení 141.576,65 (Obr. 5).

Vlastní zatížení simulující trhací práci bylo v geometrii matematického modelu umístěno ve formě rovnoměrného spojitého zatížení v místě kaloty. Doba působení dynamického zatížení byla 0,01 s. Tato hodnota vyplynula z převládající frekvence naměřené na monitorovaném objektu.

### **Výstupy a interpretace výsledků matematického modelu**

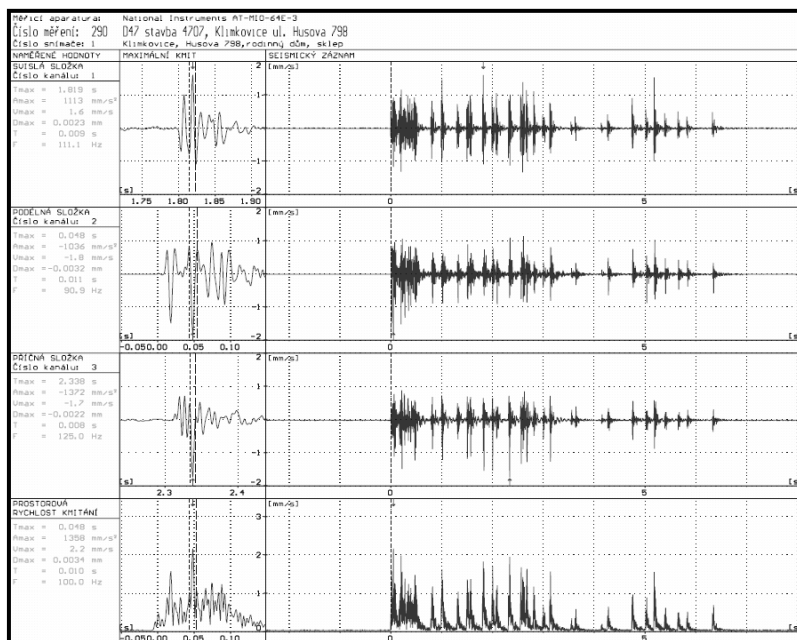
Po dopočítání prostorových vzdáleností jednotlivých trhacích prací od objektu byly za pomoci vztahu:

$$u = K \cdot \frac{\sqrt{m_{ev,n}}}{l} \quad (3)$$

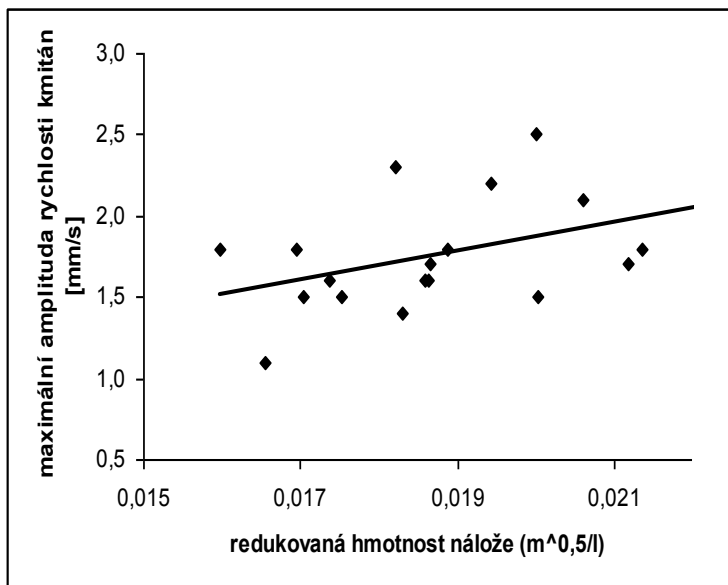
spočítány konstanty přenosu K pro jednotlivé mezní nálože  $m_{ev,n}$  příslušející naměřeným maximálním amplitudám rychlosti kmitání  $u$  (ČSN 73 0040).

Současně bylo provedeno 19 výpočtů modelovaných trhacích prací v programovém systému PLAXIS 2D. Výstupem programového systému byla maximální amplituda rychlosti kmitání pro každou z 19 trhacích prací. Tyto maximální amplitudy rychlosti kmitání se zmenšují se vzdalující se čelbou od sledovaného objektu (Tab. 2), což neodpovídá realitě – do výpočtu koeficientu dynamického zatížení (vztah Prof. Fotieové) není zahrnuta měnící se mezní nálož s postupem čelby k resp. od sledovaného objektu. Porovnání grafické závislosti reálných a napočítaných maximálních amplitud rychlosti kmitání na redukované hmotnosti nálože (kde redukovanou hmotnost nálože vyjadřuje poměr  $\sqrt{m_{ev,n}}$  – hmotnost mezní nálože, k  $l$  – vzdálenost čelby od sledovaného objektu) nevykazuje shodu. Graf 1 znázorňuje grafickou závislost maximální amplitudy rychlosti kmitání na redukované hmotnosti pro soubor dat získaných měřením odezvy trhací práce na objektu IN-SITU (koeficient korelace pro lineární závislost 0,45), graf 2 znázorňuje tutéž grafickou závislost pro

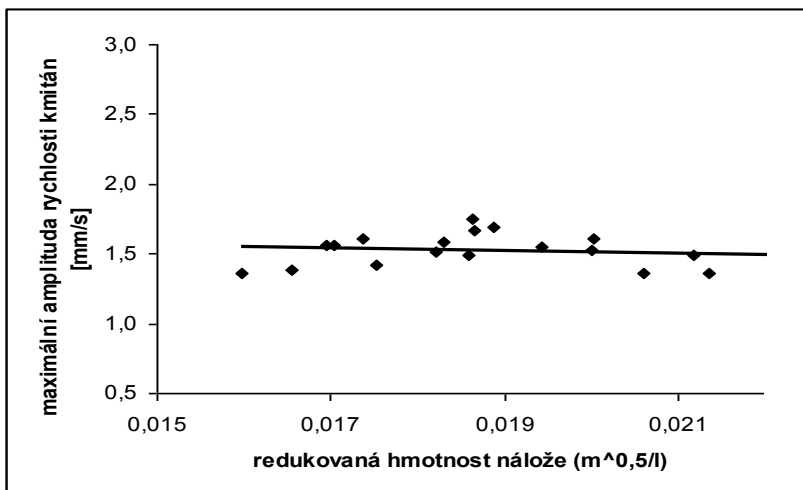
hodnoty získané z matematického modelu (koeficient korelace pro lineární závislost – 0,12).



Obr. 5 Záznam trhací práce – tunelová trouba B, staničení 141.576,65, kalota



Graf 1. Grafická závislost rychlosti kmitání na redukované hmotnosti nálože – reálné hodnoty



**Graf 2.** Grafická závislost rychlosti kmitání na redukové hmotnosti nálože – spočítané hodnoty

**Tab. 2** Reálné hodnoty a hodnoty spočítané matematickým modelem

	sledovaný bod	prostorová vzdálenost sledovaného objektu od počvy na čelbě [m]	konstanta přenosu K	mezni nálož Mev,n [kg]	naměřená maximální amplituda rychlosti kmitání [mm/s]	vypočítaná maximální amplituda rychlosti kmitání [mm/s]
čelba se přibližuje ke sledovanému objektu	1	70,01	94,90	2,4	2,1	1,4
	2	66,17	66,45	1,2	1,1	1,4
	3	62,48	85,55	1,2	1,5	1,4
	4	58,94	86,09	1,2	1,6	1,5
	5	54,78	125,01	1,2	2,5	1,5
	6	51,72	80,26	1,2	1,7	1,5
	7	47,97	91,18	0,8	1,7	1,7
	8	44,59	92,11	0,6	1,6	1,6
	9	41,02	95,32	0,6	1,8	1,7
čelba se vzdaluje od sledovaného objektu	10	41,55	85,83	0,6	1,6	1,8
	11	44,67	74,91	0,8	1,5	1,6
	12	48,86	76,47	0,8	1,4	1,6
	13	52,77	106,19	0,8	1,8	1,6
	14	56,35	113,17	1,2	2,2	1,5
	15	60,15	126,30	1,2	2,3	1,5
	16	64,29	88,03	1,2	1,5	1,6
	17	68,59	112,70	1,2	1,8	1,4
	18	72,54	84,28	2,4	1,8	1,4
	19	75,21	101,96	2,4	2,1	1,4

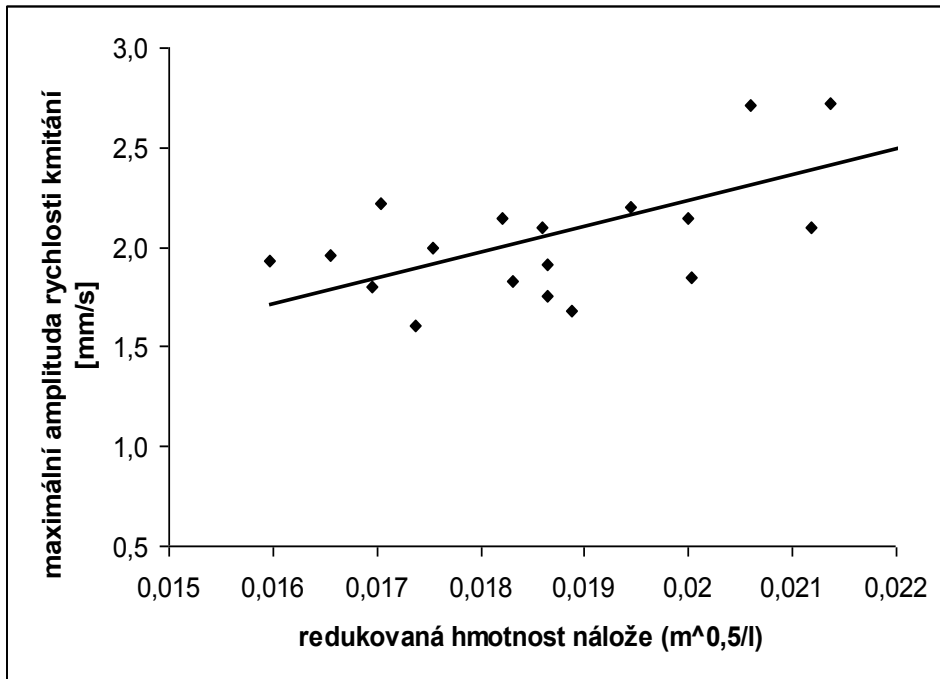
Proto byly ze vztahu (3) spočítány konstanty přenosu K pro příslušné matematickým modelem spočítané rychlosti kmitání a jednotnou mezni nálož 0,6 kg, neboť modelované dynamické zatížení vychází z trhací práce na staničení 141.576,65 viz výše. Následně byly tyto spočítané koeficienty přenosu opět použity ve vztahu (3), ale nyní již pro mezni nálože odpovídající jednotlivým trhacím pracím (0,6 kg – 2,4 kg). Výsledkem jsou maximální amplitudy rychlosti kmitání, jejichž velikosti zavedením mezni nálože odpovídají realitě (Tab 3).

**Tab. 3** Výsledné spočítané hodnoty maximální amplitudy rychlosti kmitání

	sledovaný bod	prostorová vzdálenost sledovaného objektu od počvy na čelbě [m]	mezni nálož $M_{ev,n}$ [kg]	konstanta přenosu $K$ z napočítaných rychlosti kmitání pro $M_{ev,n} = 0,6\text{kg}$	dopočítané rychlosti kmitání k příslušným mezním náložím [mm/s]
čelba se přibližuje ke sledovanému objektu	1	70,01	2,4	126,99	<b>2,8</b>
	2	66,17	1,2	118,20	<b>2,0</b>
	3	62,48	1,2	113,67	<b>2,0</b>
	4	58,94	1,2	112,94	<b>2,1</b>
	5	54,78	1,2	107,05	<b>2,1</b>
	6	51,72	1,2	99,29	<b>2,1</b>
	7	47,97	0,8	102,76	<b>1,9</b>
	8	44,59	0,6	92,41	<b>1,6</b>
	9	41,02	0,6	88,99	<b>1,7</b>
čelba se vzdaluje od sledovaného objektu	10	41,55	0,6	93,96	<b>1,8</b>
	11	44,67	0,8	92,41	<b>1,9</b>
	12	48,86	0,8	100,09	<b>1,8</b>
	13	52,77	0,8	106,19	<b>1,8</b>
	14	56,35	1,2	113,02	<b>2,2</b>
	15	60,15	1,2	117,59	<b>2,1</b>
	16	64,29	1,2	130,00	<b>2,2</b>
	17	68,59	1,2	120,74	<b>1,9</b>
	18	72,54	2,4	127,38	<b>2,7</b>
	19	75,21	2,4	131,81	<b>2,7</b>

Grafická závislost dopočítané maximální amplitudy rychlosti kmitání na redukované hmotnosti (Graf 3) nyní již ukazuje shodu s naměřenými hodnotami (koeficient korelace pro lineární závislost u dopočítaných hodnot 0,64).





**Graf 3** Grafická závislost dopočítané maximální amplitudy rychlosti kmitání na redukované hmotnosti nálože

### Závěr

V této práci byla částečně ověřena použitelnost programového systému Plaxis 2D pro modelování seizmického efektu trhacích prací prováděných v mělce budovaném podzemním díle situovaném v malé vzdálenosti od zastavěné oblasti.

V matematickém modelu bylo zadáno dynamické zatížení za pomoci vzorce profesorky Fotieové. Tento vzorec nezahrnuje parametry konkrétní prováděné trhací práce (mezní nálož). Samotné výsledky matematického modelu je nutné přepočítat k příslušným mezním náložím. Navrhovaný postup ukazuje, že lze dosáhnout shody mezi reálnými hodnotami maximální amplitudy rychlosti kmitání naměřenými IN-SITU v rámci geotechnického monitoringu a hodnotami spočítanými matematickým modelem.

Celková geometrie modelu je kvůli náročnosti výpočtu značně zjednodušená v geologii (úklon vrstev, tektonika) a v zanedbání vlivu podzemní vody, což vede ke zjednodušení a zrychlení celého výpočtu, ale také k jisté nepřesnosti. V modelu také nelze zahrnout různé anomálie, které jsou patrné z tabulky 2 (sledovaný bod 5, 14, 15) a jsou pravděpodobně způsobeny buďto lokální geologickou anomálií nebo nedodržením pasportu trhacích prací a přebitím nálože.

Takovýto matematický model může být součástí projektové dokumentace tunelu, resp. podzemní stavby a sloužit jako podklad pro pasport trhacích prací (dimenzování mezní nálože) a případná opatření v rámci realizované stavby s ohledem na povrchovou zástavbu. Nebo mohou být výsledky matematického modelu součástí inverzní analýzy geotechnického monitoringu a jako podklad pro měření seizmické odezvy trhacích prací

(možná očekávaná maximální amplituda, volba rozsahu aparatury a spouštěcí úrovně, výběr sledovaných objektů na povrchu).

*Tento příspěvek byl zpracován při řešení projektu GAČR 103/05/H036 „Analýzy spolehlivosti konstrukcí, vystavených účinkům mimořádného zatížení“*

### **Literatura**

- [1] Bulyčev, N.S. (1988): Mechanika podzemnych sooruzenij, Nedra, Moskva, UDK (622.012.2:69.035.4)(075.8).
- [2] ČSN 73 1001 – Zakládání staveb: Základová půda pod plošnými základy.
- [3] ČSN 73 0040 – Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva.
- [4] Holub, K. (2006): Vibrace vyvolané trhacími pracemi a jejich účinky na podzemní díla, povrchovou zástavbu a na obyvatelstvo, Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava – Řada stavební, 2, 113-123.
- [5] Hrubešová, E. a Aldorf, J. (2004): Analýza vlivu beranění štětovicových stěn na blízké podzemní konstrukce, Geotechnika – the conference proceeding, 57-62.
- [6] Kaláb, Z. (2007): Mělká podzemní díla a vibrace, Tunel, 2, 12-20.
- [7] Manuál programu PLAXIS 2D.
- [8] Stolárik, M. (2007): Analýza Seizmických účinků trhacích prací prováděných během výstavby tunelu Klimkovice, Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava – Řada stavební, 2/2007, 319-325.
- [9] Šřavíček, P. (2006): Diplomová práce Vliv postupu ražení tunelu Klimkovice na vývoj poklesové kotliny, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.