

## PRVNÍ VÝSLEDKY SLEDOVÁNÍ INDUKOVANÉ SEISMICITY SÍTÍ POVRCHOVÝCH STANIC V OBLASTI DOLŮ OKD, A.S.

Josef Holečko <sup>1)\*</sup>, Grzegorz Mutke <sup>2)</sup>

<sup>1</sup> Green Gas DPB, a.s., Rudé armády 637, 739 21 Paskov, Česká republika

<sup>2</sup> Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1,40-166 Katowice, Polsko

\* josef.holecko@dpb.cz

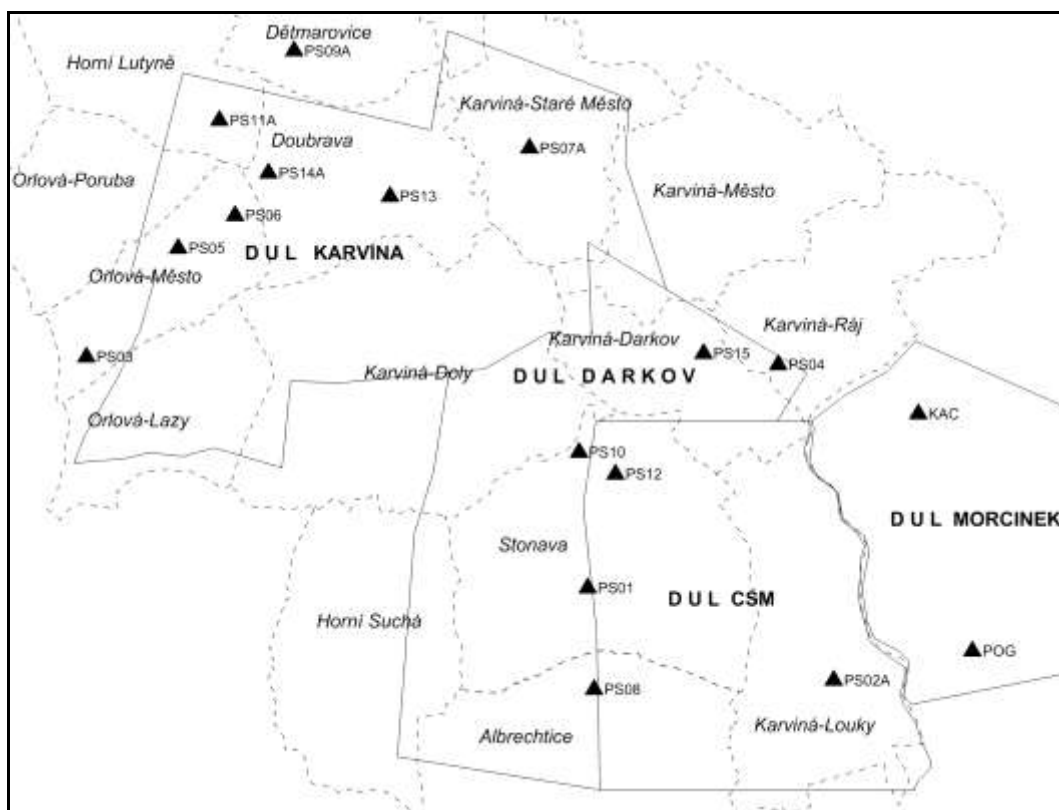
### 1. ÚVOD

Síť povrchových seismických stanic byla na základě požadavku OKD, a.s. projektována a instalována do oblastí dobývacích prostorů dolů v karvinské části OKR. V dokumentu jsou prezentovány první výsledky sledování indukované seismicity, měření rychlosti kmitání na povrchu za období cca dva a půl roku provozu a konfrontace s projekty indukované seismicity na povrchových objektech.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Seismická stanice, záchvěv povrchu, indukovaná seismicita, uhelné doly, predikce.

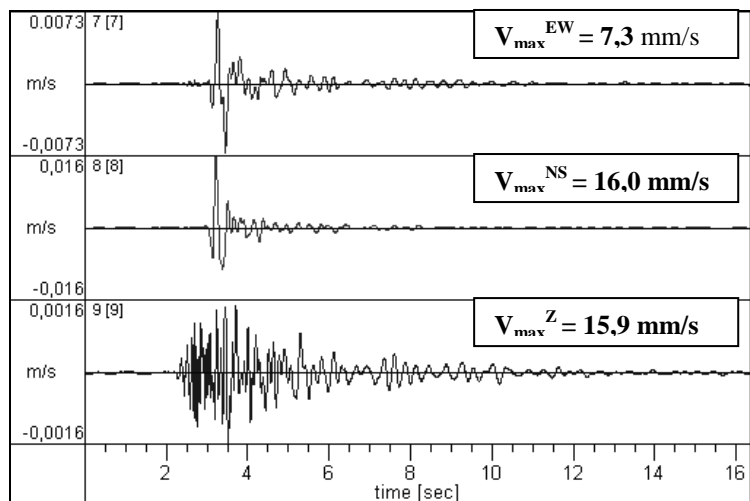
### 2. INDUKOVANÁ SEISMICITA

Síť povrchových stanic (PS) byla v OKR instalována v první polovině roku 2009 na 15 stanovištích (Holečko 2010). V průběhu dalších let bylo šest stanic přemístěno na nová stanoviště do oblastí aktuálně sledované nebo očekávané zvýšené seismické aktivity a do oblastí četných ohlašovaných povrchových záchvěvů. Současné rozmístění stanic je na Obr. 1 - kromě situování stanic jsou znázorněny dobývací prostory dolů a katastrální mapa měst a obcí.



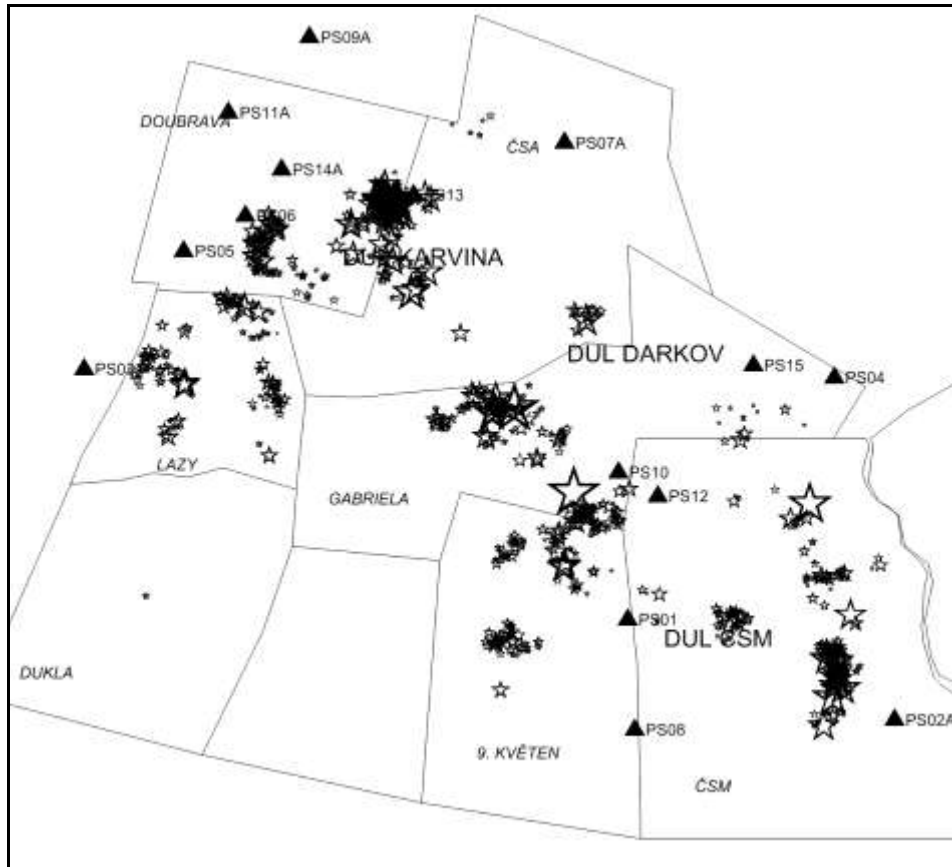
**Obr. 1** Rozmístění povrchových seismických stanic v karvinské části OKR (stav 31. 12. 2012)

Povrchové stanice jsou vybaveny registračním zařízením AMAX-GSI, vyvinutém a vyrobeném v GIG Katovice. Zařízení umožňuje registrovat rychlost kmitání do  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ve frekvenčním pásmu 2 až 50 Hz. Seismické záznamy (trigovaná data) jsou po síti mobilního operátora stahovány ve zvolených časových intervalech do centra v Paskově. Příklad záznamu (průběh rychlosti kmitání na složkách EW, NS, Z) energeticky silného seismického jevu z Dolu Darkov, zaregistrovaného stanicí PS04 v Karviné-Ráji, je uveden na Obr. 2 (jev ze dne 22. 1. 2012, energie  $9,1 \times 10^5 \text{ J}$ , epicentrální vzdálenost 1770 m).



**Obr. 2** Průběh rychlosti kmitání povrchu na stanici PS04 - seismický jev dne 22. 1. 2012

Za období od zahájení provozu povrchové sítě stanic, tj. od 10. 6. 2009, do 31. 12. 2011 vzniklo v OKR celkem 872 energeticky významných seismických jevů (od energie  $1 \times 10^4 \text{ J}$ ). Lokalizace těchto jevů je na Obr. 3.



**Obr. 3** Lokalizace seismických jevů v karviné části OKR (10. 6. 2010 - 31. 12. 2011)

Základní informace o dosavadním měření maximální hodnoty horizontální složky rychlosti kmitání  $VH_{max}$  jsou uvedeny v Tabulce 1 a 2.

**Tabulka 1** Seismické jevy v OKR v období od 10. 6. 2009 do 31. 12. 2011

Energie	Počet jevů z OKR / rok			Počet jevů na PS / rok			Počet záznamů na PS / rok		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
E+04 J	230	219	301	99	155	162	167	362	313
E+05 J	44	29	34	36	29	33	120	120	138
E+06 J	4	2	8	4	2	8	27	18	67
E+07 J	0	0	1	0	0	1	0	0	12
Celkem / rok	278	250	344	139	186	204	314	500	530
Celkem 2009-2011	872			529			1344		

V Tabulce 1 je uvedena četnost seismických jevů zaregistrovaných z OKR s energiemi od  $1,0 \times 10^4$  J (podle databáze centra Green Gas DPB, a.s.) od zahájení provozu povrchové sítě, tj. od 10. 6. 2009, do 31. 12. 2011, dále četnost seismických jevů zaznamenaných alespoň jednou PS a celková četnost získaných záznamů na všech PS. Do konce roku 2011 bylo z celkového počtu 872 seismických jevů indukovaných hornickou činností dolů OKD, a.s. zaznamenáno sítí PS celkem 529 jevů a stanicemi PS bylo pořízeno dohromady 1344 záznamů.

Zaznamenány byly seismické jevy s hodnotou energie do  $1,4 \times 10^7$  J, magnitudo do 2,61. Četnosti záznamů na jednotlivých PS se velmi liší, naměřené maximální hodnoty horizontální složky rychlosti kmitání  $VH_{max}$  převažovaly do  $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , nejsilnější jevy se však projevovaly rychlostí kmitání nad  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , největší zaznamenaná hodnota byla  $33,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , jak je uvedeno v Tabulce 2.

**Tabulka 2** Záznamy seismických jevů povrchovými stanicemi

Seismické stanice (15)	Počet záznamů podle velikosti $VH_{max}$ (mm/s)					Celkem záznamů	$VH_{max}$ (mm/s)	Dep <sub>min</sub> (km)	Dep <sub>max</sub> (km)
	< 3,0	3,0 - 4,99	5,0 - 9,99	10,0 - 14,99	≥ 15,0				
PS01	16	1	1	1	0	19	11,6	0,80	3,36
PS02	79	5	1	0	0	85	5,9	0,32	5,48
	PS02A	3	0	0	0	3	2,9	1,55	6,67
PS03	52	0	0	0	0	52	2,6	0,70	11,18
PS04	45	1	2	0	0	48	8,5	0,77	8,03
PS05	85	2	1	0	0	88	5,5	0,74	10,70
PS06	100	5	2	0	0	107	6,2	0,24	11,69
	PS06A	2	0	0	0	2	0,4	2,77	3,44
PS07	4	2	0	0	0	6	4,2	0,74	2,25
	PS07A	1	1	0	0	2	3,5	2,44	3,60
PS08	74	0	1	0	0	75	9,8	1,77	7,98
PS09	9	0	0	0	0	9	1,5	1,63	8,53
	PS09A	48	2	1	1	52	10,4	1,54	11,10
PS10	91	2	3	0	0	96	8,5	0,25	4,86
PS11	103	1	0	0	0	104	3,5	1,69	11,59
	PS11A	25	1	1	0	27	5,2	1,79	6,97
PS12	183	2	2	0	1	188	26,0	0,53	5,52
PS13	115	20	25	8	3	171	33,4	0,12	8,90
PS14	53	7	0	0	0	60	4,5	0,52	2,94
	PS14A	107	14	10	3	135	29,6	0,76	10,39
PS15	14	0	1	0	0	15	6,3	0,63	5,52
21 lokalit	1 209	66	51	13	5	1 344	33,4	0,12	11,69

Z Tabulek 1 a 2 plyne, že počet záznamů zejména energeticky silných seismických jevů je malý a, jak bude ukázáno dále, pro stanovení věrohodnějších závislostí  $VH_{max}$  na energii a vzdálenosti seismických jevů je zatím nedostatečný.

### 3. STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ RYCHLOSTI KMITÁNÍ NA POVRCHU

Chceme-li hodnotit účinky indukované seismicity na povrchu v místech mimo povrchové stanice, pak seismické účinky musíme prognózovat, tj. sestavit empirické závislosti mezi rychlostí kmitání v daném místě povrchu a parametry seismického jevu - jeho energií a epicentrální vzdáleností, resp. hloubkou ohniska.

#### 3.1. REGIONÁLNÍ PROGNÓZA

V minulosti byla vypracována empirická závislost (Mutke 1991, Mutke, Dworak 1992) pro určení amplitudy rychlosti kmitání pevného podkladu (základové půdy)  $V_{MD}$ , platná v širší oblasti polské části kamenouhelného revíru hornoslezské pánve (GZW). Za předpokladu, že podmínky v obou částech hornoslezské pánve (polské i české) jsou obdobné, byl tento regionální vzorec nyní upraven pro OKR do tvaru:

$$V_{MD} = [1,48 \cdot 10^{-3} (\log E_p)^{1,23} - 0,011] [1,55R^{0,135} \exp(-0,77R) + 0,04] , R = \sqrt{D^2 + h^2}$$

kde:  $E_p = 386 \cdot E^{0,7895}$ ,  $E$  – seismická energie [J],

$D$  – epicentrální vzdálenost [km],  $h$  – hloubka ohniska [km].

V regionální prognóze je dále nutno zohlednit vliv lokální stavby přívěrchových geologických vrstev na kmitání povrchu zavedením koeficientu zesílení kmitání  $W_f$  daného podloží oproti podloží pevnému. Koeficient se stanovuje analytickým řešením v síti uzlových bodů dostatečně husté, tak aby odrazila lokální změny pokryvu. Vychází z tloušťky vrstev a litologické stavby pokryvu nebo z rychlosti šíření příčné vlny  $V_S$  ve vrstvách pokryvu do mocnosti 30 metrů na základě seismických profilových měření. Vztah pro prognózovanou maximální rychlost kmitání v horizontálním směru na povrchu ( $VH_{max}$ ) pak dostává tvar:

$$VH_{max} = V_M \cdot W_f$$

Takto vypočtená maximální amplituda horizontální složky rychlosti kmitání  $VH_{max}$  může být ekvivalentem stanicemi naměřené velikosti rychlosti kmitání. Vztah je používán v Polsku k hodnocení účinků seismických jevů indukovaných hornickou činností pomocí stupnice posuzování intenzity kmitání  $GSI_{GZW}$ . V případě regionálního modelu je nutno pro hodnocení účinků kmitání pomocí této stupnice vycházet z velikosti vypočtené hodnoty rychlosti kmitání podkladu  $VH_{max}$  a přijaté doby trvání kmitání nad 3 s (Dubiński a kol. 2009).

#### 3.2. LOKÁLNÍ PROGNÓZA

Detailní (lokální) prognózu lze provádět v oblastech s dostatečně hustou sítí seismických stanic a dostatečným počtem zaznamenaných seismických jevů. Jen tak lze postihnout lokální změny v šíření seismické energie související s charakteristikami ohnisek seismických jevů, s funkcemi tlumení pružných vln při jejich průchodu horninovým prostředím a s vlivy lokální geologické stavby přívěrchových vrstev (zesílení/zeslabení kmitů). Detailní prognóza musí zohlednit analýzu a zpracování několika lokálních empirických závislostí v dané oblasti, dostatečně reprezentativních pro konkrétní a jim obdobné podmínky geologické stavby vrstev pokryvu.

Na základě záznamů sítě povrchových seismických stanic bylo možno přistoupit i ke zpracování prvních testovacích vztahů lokální prognózy seismických účinků pro OKR. Podle předpokladů by lokální vzorce měly poskytovat přesnější hodnoty, než jaké poskytuje regionální vzorec pro širší region. Závislost  $VH_{max}$  na epicentrální vzdálenosti a energii seismických jevů, při zohlednění doby trvání seismického jevu, vychází z modelu Joiner-Boore (Joiner and Boore 1981), který předpokládá, že úroveň kmitání roste s energií a klesá s epicentrální vzdáleností. Lineární závislost se stanoví v programu STATISTICA regresní metodou.

Lineární tvar vícenásobné regresní analýzy má obecný tvar:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_0 ,$$

kde:  $y$  – závislá proměnná,  $b_0$  – konstanta,  $b_i$  – parametry modelu – koeficienty regrese,

$x_i$  – nezávislé proměnné

Základní vzorce pro útlum kmitání s využitím pro lokální prognózu maximální rychlosti kmitání  $VH_{max}$  byly zpracovány záznamy s časem trvání v intervalu 1,5 - 3,0 nad 3 s.

Jako příklad uvádíme lokální závislost určenou pro seismickou stanicí PS13 (Doubrava), která byla stanovena ve tvaru (epicentrální vzdálenost 150 m až 4000 m, energie od  $1 \times 10^4$  J do  $1 \times 10^7$  J) - viz Tabulka 3:

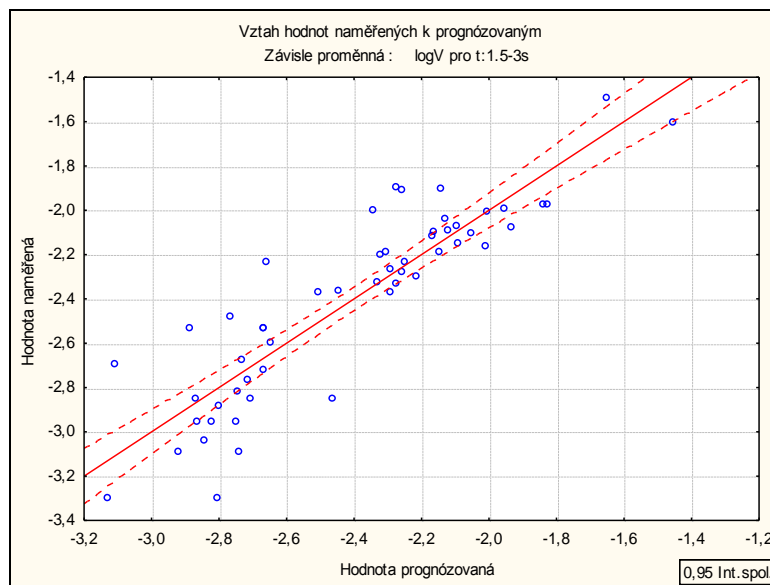
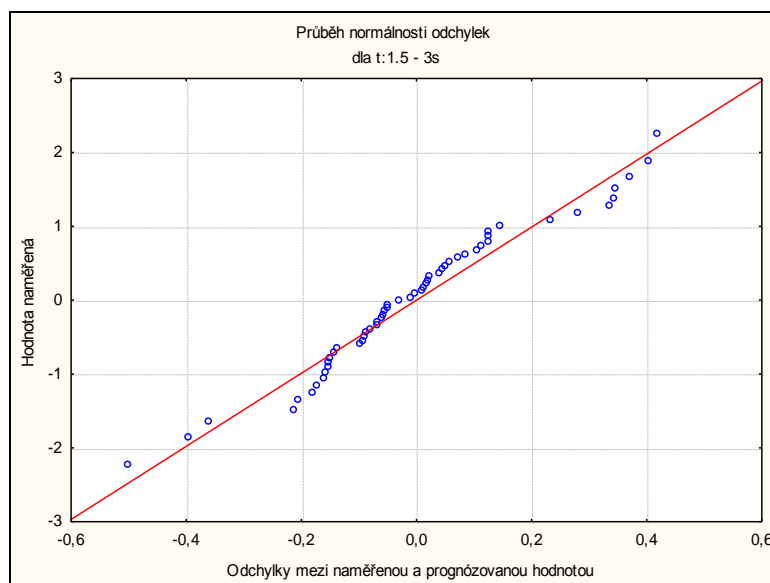
$$\log(VH_{max}) = 0,58 \log(E) + 0,37 \log(D) - 6,39 ,$$

kde:  $E$  – seismická energie [J],  $D$  – epicentrální vzdálenost [m], koef. jsou  $R=0,89$  a  $R^2=0,79$

**Tabulka 3** Statistika regresní křivky pro stanici PS13, doba trvání kmitání 1,5 - 3,0 s

		Souhrn regrese závisle proměnné: logV (t:1.5-3s) R= .88935040 R <sup>2</sup> = .79094413 Oprav. R <sup>2</sup> = .78274586 F(2,51)=96.477 p<.00000 Chyba stan. odch.: .19749					
N=54		b*	St. odch. z b*	b	St. odch. z b	t(51)	p
konstanta				-6,38879	0,53698	-11,8976	0,00000
logE		0,93895	0,06921	0,58162	0,04287	13,5662	0,00000
logd		0,16557	0,06921	0,36907	0,15427	2,3922	0,02047

Na Obr. 4 a Obr. 5 je uveden vztah hodnoty pozorovaných (naměřených) k hodnotám prognózovaným v intervalu 95% spolehlivosti:

**Obr. 4** Průběh rozptylu naměřených a prognózovaných hodnot s vynesemím intervalu 95% spolehlivosti (PS13, doba kmitání v intervalu 1,5 - 3,0 s)**Obr. 5** Průběh normálnosti odchylek naměřených a prognózovaných hodnot (PS13, doba kmitání v intervalu 1,5 - 3,0 s)

Obecně pro soubor záznamů seismických jevů z povrchových stanic OKR za období od zahájení registrace do 31. 12. 2011 lze konstatovat, že hodnoty rychlosti kmitání  $V_{H_{max}}$  vypočtené regionální prognózou vykazují od naměřených hodnot standardní odchylku převážně 30 %. Jsou však i výraznější odchylky, přičemž teoretické hodnoty jsou častěji nižší (viz následující příklad).

Příklad porovnání maximálních hodnot horizontální složky rychlosti kmitání  $V_{H_{max}}$  uvádíme pro seismický jev regionálního charakteru ze dne 29. 6. 2011, energie  $4,4 \times 10^6$  J, v epicentrální vzdálenosti 240 m od stanice PS13:

- naměřená hodnota ( $31,6 \text{ mm.s}^{-1}$ , doba trvání 2,0 s)
- hodnota dle testovaného lokálního vztahu ( $22,0 \text{ mm.s}^{-1}$ , doba trvání 1,5 až 3,0 s)
- hodnota dle regionálního vztahu GIG pro OKR ( $10,0 \text{ mm.s}^{-1}$ , doba trvání > 3s)

Z provedených výpočtů vyplývá, že lepší shodu s naměřenou hodnotou vyazuje lokální prognóza, obě vypočtené hodnoty jsou však nižší než hodnota skutečná.

Pro vypracování věrohodnějších lokálních závislostí pro stanovení  $V_{H_{max}}$  pro oblast OKR je nezbytné shromáždit větší soubor hodnot naměřených na různých stanicích a pro seismické jevy z různých ohniskových oblastí je nezbytné ověřit další tvary regresní funkce, zohledňující různé třídy podloží. Třídy podloží musí být určeny hodnotou rychlosti šíření příčné S-vlny na hloubkovém profilu do 30 m, označované  $V_{S30}$  obdobně jak se klasifikuje podloží v normě Eurokód 8. Za tím účelem bude nutno na vybraných lokalitách OKR realizovat několik doplňujících seismických měření. Funkce závislosti útlumu maximální hodnoty rychlosti kmitání se vzdáleností, která zohledňuje třídy pomocí rychlosti šíření příčné S-vlny, dostává tvar (Chodacki 2011):

$$\log(V_{max}) = 0.147 \log(E) - 0.096R - \log(R) - kR + S_i,$$

kde:  $V_{max}$  – maximální hodnota rychlosti kmitání [ $\text{mm.s}^{-1}$ ], E – seismická energie [J],

R – vzdálenost od ohniska [km],  $k=0,003$ ,

$S_i$  – hodnota parametru popisuje třídu podloží (A, B, C) v závislosti na rychlosti šíření seismické vlny S ve třicetimetrové vrstvě pokryvu podle normy Eurokód 8.

#### 4. POROVNÁNÍ INDUKOVANÉ SEISMICITY V REGIONECH GZW A OKR

První srovnání výsledků měření indukované seismicity na území Polska (GZW) a České republiky (OKR) je uvedeno v Tabulce 4.

**Tabulka 4** Srovnání parametrů indukované seismicity pro oblasti GZW a OKR

Sledované parametry	Oblast	
	Doly GZW	Doly OKR
Hodnocené období	10 let	2,5 roku
Maximální hodnota horizontální složky rychlosti kmitání [ $\text{mm.s}^{-1}$ ]	60	33
Čas trvání kmitů v epicentrální oblasti [s]	0,5 - 10	0,5 - 10
Špičková hodnota zrychlení [ $\text{mm.s}^{-2}$ ]	1300	700
Frekvence energeticky silných seismických jevů [Hz]	1 - 15	250
Frekvence regionálních seismických jevů [Hz]	0,5 - 5	0,5 - 5
Největší hodnota seismické energie [J]	$3 \times 10^9$	$1,4 \times 10^7$
Největší hodnota magnitudo	4,0	2,6
Poměr PGA/PGV	13 - 40	15 - 35

Základní parametry seismických jevů vyvolaných hornickou činností v GZW a OKR jsou pro obě oblasti obdobné. Nižší hodnoty poměru PGA/PGV (Poměr PGA/PGV je poměr špičkové hodnoty zrychlení a maximální hodnoty horizontální složky rychlosti kmitání) naznačují větší podíl nízkofrekvenčních kmitů na záznamu, tedy i kmitů nebezpečnějších pro povrchové budovy.

#### 5. PROJEVY INDUKOVANÉ SEISMICITY NA POVRCHU

Z analýz prováděných v oblasti GZW plyne, že nejsilnější seismické jevy se projevují poškozením stupně II, ojediněle stupně III (do 25 % nad spodní mezi) podle stupnice  $GSI_{GZW}$  (Mutke, G., Chodacki, J. 2010).

Podle povrchových měření provedených do konce roku 2011 v oblasti OKR lze účinky seismických jevů na povrchu zařadit podle stupnice  $GSI_{GZW}$  do stupně poškození 0 nebo I, v ojedinělých případech naměřené hodnoty horizontální složky rychlosti kmitání jsou v blízkosti spodní meze stupně II. Podle české normy pro posuzování technické seismicity ČSN 73 0040 jsou projevy pro rodinné domy zařazeny převážně do stupně 0 a I,

ojedinele do stupně 2, pro panelové domy převážně do stupně 0, ojedinele do stupně 1. Ohlášené škody na objektech jsou převážně na vnitřních a vnějších omítkách, nejčastěji se jedná o drobné trhliny, rozšíření dřívějších prasklin nebo starého poškození, opadání uvolněné omítky, drobné trhliny kolem dveří či oken apod. Seismické jevy až dosud na objektech nezpůsobily vážnější škody (poškození nosných prvků, narušení statiky objektu). Příklad dlouhodobého monitoringu změn a poškození na objektu v centru obce Doubrava je uveden na Obr. 6.



**Obr 6** Fotodokumentace postupného poškození vnější omítky na objektu v centru obce Doubrava (postupně stav 23.6.2010, 30.6.2011 a 19.7.2011)

Monitorovaný objekt se nachází ve vzdálenosti 0,2 až 2,0 km od epicenter silných seismických jevů a je opakovaně vystaven seismickým účinkům. Fotodokumentace pořízená v různých časových obdobích zachytila postupné poškozování vnější omítky. Na snímcích je stav ve dnech 23. 6. 2010, 30. 6. 2011 a 19. 7. 2011. Omítka v roce 2009 byla v okolí místa označeného šipkou sice narušena, ale v označeném místě nebyla ještě výrazněji poškozena. V polovině roku 2011 omítka na stejném místě byla již lehce narušena a došlo k menšímu odloupení a odpadnutí omítky. Snímek ze dne 19. 7. 2011 dokumentuje stav krátce po vzniku blízkého (epicentrální vzdálenost 300 m) silného seismického jevu (energie  $8,3 \times 10^6$  J) dne 14. 7. 2011 - na stejném místě bylo zjištěno odpadnutí omítky a vznik dalších drobných trhlin.

Výhledově bychom chtěli realizovat fotodokumentaci a pasportizaci dalších stavebních objektů, na základě které budeme schopni lépe posuzovat poškození objektů po výskytu energeticky silných seismických jevů v různých lokalitách OKR.

## 6. ZÁVĚR

Dosavadní analýzy ukazují, že dosavadní soubor záznamů silných seismických jevů naměřených povrchovými stanicemi ještě není nedostatečný pro vypracování věrohodných lokálních závislostí pro celou oblast karvinské části OKR. Rovněž současný soubor dat projevů intenzivních seismických jevů na povrchových objektech neposkytuje dostatek podkladů pro verifikaci polské stupnice GSI v podmínkách OKR.

## LITERATURA

- Dubliński, J., Mutke G., Stec K., Lurka A., Barański A. Górnictwo Skala Intensywności GSI-GZW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w Zakładach Górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko* nr 2/2/2009, 73-90.
- Holečko, J. New seismic network for monitoring of influence of mining seismicity on the surface in Ostrava-Karviná Coalfield. *Documenta Geonica* 2010/1 (Eds. P. Koniček, K. Souček), Academy of Sciences of the Czech Republic, Institute of Geonics, Ostrava, 115-125, (in Czech).
- Chodacki J. Określenie modelu propagacji fal sejsmicznych w ośrodku skalnym z uwzględnieniem lokalnych warunków geologicznych dla GZW, *Górnictwo Zagrożenia Naturalne* 2011, *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko* nr 4/2/2011, 60-68.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 1981, 2011-2038.
- Mutke, G. Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górnictwymi w obszarze GZW. *Rozprawa doktorska, Główny Instytut Górnictwa - Katowice* 1991.

- Mutke, G. Seismic monitoring and the forecast of the influence of mining seismic events on the surface basing on Mining Instrumental Scale of Seismic Intensity GSIGZW - Monitorowanie drgań i prognoza oddziaływania wstrząsów górniczych na powierzchnię w oparciu o Górnictwą Skalę Intensywności drgań GSIGZW. Documenta Geonica 2010/1 (Eds. P. Koniček, K. Souček). Academy of Sciences of the Czech Republic, Institute of Geonics, Ostrava, 49-66, (in Polish).
- Mutke, G., Chodacki, J. Charakterystyki parametrów drgań od najsilniejszych wstrząsów regionalnych w GZW w aspekcie kryteriów oceny intensywności w oparciu o skalę GSIGZW. Wstrząsy górnicze - charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane, Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko nr 4/4/2010, 65-80.