

RNDr. Vladimír T o b y á š , CSc., Geofyzikální ústav ČSAV, Praha

RNDr. Dana P r o c h á z k o v á , DrSc., Geofyzikální ústav ČSAV, Praha

Seizmicita oblasti VČSA a seizmické vlivy na svahy

Úvod

Mezi řadu příčin, které mohou negativně ovlivňovat stabilitu vysokých svahů patří i účinky seizmických vln (1). Jejich zdrojem může být přirozená seismicita, která zahrnuje místní a blízká zemětřesení a indukovaná seismicita, vyvolaná rozsáhlými zásahy člověka do ustáleného přírodního režimu. K těmto jevům je nutno ještě připočítat působení seizmických vln vznikajících při odstřelech, tzv. technická seismicita. Na daném území nelze vyloučit potenciální účinky všech uvedených zdrojů.

Přirozená seizmická aktivita je sice v současné době slabá, ale již dříve zde vznikla řada zemětřesení s makroseismickými účinky (2,3). Velké přesuny hmot při povrchové těžbě ve značných hloubkách mohou být příčinou vzniku indukovaných zemětřesení (4), tj. mohou způsobit uvolnění existujícího tektonického napětí. Hromadné odstřely ("nátřasné odstřely") se používají ve Velkolomu čs. armády jako běžná součást technologie těžby (5).

Intenzivní seizmické vlny, ať jsou jejich zdrojem odstřely, lokální či blízká zemětřesení, vyvolávají při průchodu horninou přídatné síly, které se sčítají se silami, které v oblasti trvale působí; sem patří tektonické síly a gravitace. I při této krátkodobé změně může být za určitých podmínek dosažena mez pevnosti horninového masívu a mohou vzniknout trhliny formou křehkého porušení; při dosažení meze pružnosti mohou vzniknout trhliny s časovým zpožděním přes stádium plastické deformace. Představa o působení seizmických vln na horninový masív je následující. Podélná vlna charakterizovaná zhuště-

ním a zředěním prostředí podél seizmického paprsku se uplatňuje především tahovou složkou, neboť pevnost v tahu je podstatně menší než pevnost v tlaku. K deformaci a k následujícímu vzniku tahové trhliny může tudíž dojít při dopadu diletanční vlny nebo při odrazu kompresní vlny na zemském povrchu nebo na rozhraní vrstev. Příčná vlna, charakterizovaná příčnými kmity částic prostředí vzhledem ke směru šíření seizmické vlny, může vyvolat porušení horninového masívu formou střížných trhlin, a to především na plochách se sníženou mezí pevností ve smyku. Působení seizmických vln na svahy se vektorově sčítá s působením zemské tíže a vzniká tzv. seismogravitanční efekt. Při druhé fázi deformace svahu pak může tento efekt iniciovat přechod ke třetí fázi v případech, kdy by k němu bez dynamického zatížení vůbec nedošlo a pohyb svahu se samovolně ukončil vytvořením nového stabilního svahu. Obdobně při třetí fázi deformace svahu může být seizmické zatížení impulsem ke zrychlení pohybu svahu zakončeného jeho zřícením.

Z této úvahy plyne, že maximální seizmické zatížení svahu, při kterém není ještě významně ovlivněn dosavadní průběh deformací, se v různých fázích deformace svahu podstatně liší. Úkolem seizmického výzkumu je průběžné sledování zdrojů seizmických vln a jejich velikosti v širší oblasti kolem lomů, určení potřebných veličin ke stanovení největších přípustných zatížení na exponovaných svazích v konkrétním časovém okamžiku a kontrolování skutečných zatížení na rizikových místech po dobu těžby.

Geofyzikální ústav ČSAV zahájil koncem roku 1982 sledování současné seismicity v širší oblasti SHR a počátkem roku 1988 zahájil seizmická měření přímo na svahu Jezerky. V tomto článku jsou stručně shrnuty dosažené výsledky, z nichž část již byla publikována (2,3,6 - 14), a které jsou v širším rozsahu uvedeny v interních zprávách "Seizmický výzkum oblasti SHR" 1 - 7 (GFÚ ČSAV, Praha 1983 - 1988).

Seizmicita oblasti SHR v letech 1982 - 1987

Na sledování současné seizmicity bylo vybráno území SHR s přilehlými Krušnými horami mezi $50^{\circ}10' - 50^{\circ}50'N$ a $13^{\circ} - 14^{\circ}E$. VČSA leží přibližně ve středu takto vymezené oblasti. Pro rychlé, finančně málo náročné zajištění seizmických měření, bylo pro počáteční etapu navrženo využít vysoce citlivé seizmické stanice mezinárodní sítě na území ČSR, NDR a PLR doplněné o jednu stanici ve středu sledované oblasti. Nejprve byla zkušební lokální stanice na zámku Jezeří a později byla přesunuta do Vysoké Pece. Tato stanice je dosud v provozu ve spolupráci s k. p. DVIL Komořany. Výpočty lokalizační a detekční schopnosti uvažované sítě stanic ukázaly, že lze na daném území lokalizovat otřesy od magnituda 2 výše a detekovat alespoň dvěma stanicemi otřesy od magnituda 0,5 výše. To znamená, že makroseizmicky pocítená zemětřesení s magnitudem větším než 2,4 lze lokalizovat, detekovat lze jevy pod hranicí makroseizmických pozorování asi 1000 x energeticky slabší.

Počty seizmických jevů zaznamenaných v letech 1982 - 1987 jsou shrnuty v tabulce 1. V oblasti se vyskytuje mimořádně velké množství různých seizmických jevů, které jsou na seizmogramech a ztěžují identifikaci přirozených zemětřesení nebo indukovaných otřesů. Lokalizované otřesy se soustřeďují do míst s povrchovými lomy a nejbližšího okolí včetně Krušných hor a jsou zhruba na území vymezeném souřadnicemi $50,4^{\circ} - 50,65^{\circ}N$ a $13,1^{\circ} - 13,8^{\circ}E$. Převážnou část tvoří seizmické jevy umělého původu (odstřely v povrchových uhelných lomech a kamenolomech). Mezi otřesy tektonického původu jsou zařazovány pouze jevy v nočních hodinách, protože dosud nedovedeme odlišit přirozené a umělé jevy na základě seizmogramů. V tabulce je poměrně mnoho jevů neznámého původu. Mezi nimi mohou být nehlášené odstřely, odstřely provedené v jiný než ohlášený čas (např. v roce 1987 nebylo zaznamenáno 10 % všech evidovaných nátlasných odstřelů v uhelných lomech, z toho ve VČSA 3 %),

tektonické otřesy v denní době, otřesy indukované těžbou a případně dotřesy po odstřelech iniciované přerozdělením napětí v povrchových vrstvách, ke kterému dochází v důsledku rozpojení velkého objemu hornin. Zpřesněním evidence odstřelů se podařilo v posledních třech letech snížit počet neidentifikovaných otřesů a v posledním roce bylo možné na základě podrobného sledování vyloučit i seizmické odezvy na tlakové vzdušné vlny.

Tektonické otřesy uvedené v tabulce 1 jsou vesměs velmi slabé a jsou zjistitelné pouze přístroji. Jejich vznik není během roku rovnoměrný, zvýšení jejich počtu se pozoruje zpravidla ve dvou obdobích během roku. Přibližně u desetiny tektonických jevů (43) byla určena magnituda z doby trvání; jejich hodnoty jsou mezi $0 \pm 0,3$ až $1,2 \pm 0,3$; zbývající jevy jsou ještě slabší.

Z praktického hlediska je nutno posoudit vztah současného seizmického režimu k dřívější aktivitě s makroseismickými projevy. Tuto souvislost lze studovat pomocí obecně platného empirického vztahu mezi logaritmem četnosti jevů a energií, resp. magnitudem zemětřesení. Pro 43 zemětřesení z let 1784 - 1910 s magnitudy mezi 2,4 až 4,6 (epicentrální intenzita 3^0 - $6,5^0$ MSK-64) je statistický model výskytu zemětřesení ve velmi dobré shodě s pozorováním. Sumární četnosti extrapolované do oboru slabších mikrozemětřesení a přepočtené na výskyt otřesů N_y v jednom roce (tab. 2), souhlasí řádově s pozorováním z let 1982 - 1986. Z toho lze usoudit, že proces uvolňování tektonické energie v současnosti má stále stejný charakter, tj. vznik silných lokálních zemětřesení není vyloučen. Největší zemětřesení očekávané ve sledované oblasti by mělo intenzitu $6,5^0$ MSK-64, čemuž odpovídají maximální hodnoty výchylky pohybu půdy $d = 0,55 - 5,2$ mm, rychlosti $v = 29 - 58$ mm/s a zrychlení $a = 350 - 700$ mm/s². Pro menší intenzity 5^0 a 6^0 jsou parametry pohybu půdy v tab. 3. Tabulka uvádí též střední doby opakování zemětřesení pro vý-

Tab. 1 Počty zaznamenaných seizmických jevů v oblasti SHR

Rok	Celkem	Lokali- zované	Deteko- vané	Odstře- ly	Zdroj jevů	
					tektonický	neznámý
1982 ⁺⁾	608	582	26	349	6	253
1983	1323	605	718	622	53	648
1984	2291	971	1320	999	191	1101
1985	1841	1162	679	1055	86	700
1986	1775	1160	615	1057	74	644
1987	1570	1276	304	1190	29	351
Celkem	9408	5746	3662	5272	439	3697

+) Lokální stanice byla v provozu pouze 3 měsíce.

Tab. 2 Roční kumulativní četnosti zaznamenaných mikrozemětřesení ve srovnání s modelem jejich výskytu

Magnitudová třída $M_i \pm 0,3$	N_y	
	Pozorování 1982 - 1986	Model
0	8,9	9,2
0,6	7,8	3,6
1,2	1,6	1,4
1,8	0	0,56

Tab. 3 Střední doby opakování T a rozsahy pohybu půdy zemětřesení s intenzitami I_0 —

$I_0 \pm 0,5$ [°MSK - 64]	T [rok]	d [mm]	v [mm/s]	a [mm/s ²]
5	32	0,1 - 1	10 - 20	120 - 250
6	96	0,3 - 4,5	21 - 40	250 - 500

še diskutovaný model jejich výskytu. Ve všech případech jsou převládající frekvence pohybu půdy 10 - 0,5 Hz a doba trvání pohybu půdy 1 - 50 s.

Trvalé deformace jsou v makroseizmických stupních popisovány až u zemětřesení s intenzitou 6⁰ MSK-64 (trhliny na svazích kolem 1 cm, v ojedinělých případech sesuvy svahů). Ve zkoumaném období byla pozorována v oblasti VČSA největší intenzita 4,5⁰ MSK-64 (při zemětřesení v západních Čechách 21. 12. 1985, které mělo epicentrální intenzitu 7⁰ MSK-64) bez zřejmého vlivu na svahy.

Technická seizmicita

Převážnou část současné seizmicity oblasti tvoří technická seizmicita v důsledku velkého množství odstřelů v uhelných lomech. Její zdroje jsou v řadě lomů od Kadaně po Bílinu a při budoucí těžbě u svahů Krušných hor mohou vzniknout problémy s negativním působením seizmických vln, vyvolaných těmito odstřely na svahy. Ve srovnání se zemětřeseními s neznámým přesným místem, časem vzniku a intenzitou, je regulace účinků odstřelů plně zvládnutelná. Přesné stanovení pohybu půdy při odstřelech na jednotlivých rizikových svazích není podle měření ve Vysoké Peci možné. Složitá geologická struktura a proměnné vyzařovací charakteristiky odstřelů, které závisí na mnoha parametrech, nedovolují určit spolehlivě střední útlum maximální fáze seizmických vln. Z tohoto důvodu je nutné provádět seizmická měření přímo na sledovaných svazích. Základním požadavkem je zajistit nepřetržitá měření odstřelů nad danou úrovní a také záznam dalších, náhodně se vyskytujících seizmických jevů.

Poněvadž velikost napětí v hornině při seizmickém zatížení je úměrná rychlosti kmitání částic, je vhodné pro měření použít seizmografy s nezkresleným záznamem rychlosti pohybu

půdy. Přídavné dynamické napětí vyvolané seizmickými vlnami lze pak hodnotit podle naměřené maximální rychlosti. S ohledem na změny vlastností horninového masívu a stability svahu v průběhu odtěžování paty svahu nelze pokládat maximální přípustné napětí, a tedy i maximální přípustné rychlosti kmitání, za konstantní veličiny; v literatuře udávané maximální přípustné rychlosti (tzv. kritické rychlosti) jsou v rozmezí 3 řádů - od několika mm/s až po 1000 mm/s. Aby se na jedné straně bezdůvodně neomezovala velikost nátlasných odstřelů a na druhé straně se udržely jejich účinky pod hranicí negativního působení na svahy, je třeba průběžně měřit seizmické zatěžování svahu. Dalším přínosem nepřetržitého seizmického měření je možnost registrace seizmických vln provázejících vznik mikrotrhlin a trhlin v blízkosti seizmografu. Podle publikovaných údajů dochází ke vzniku mikrotrhlin, jestliže napětí dostoupí na hodnotu $1/2$ meze pevnosti. Emise seizmických vln je závislá na objemu materiálu, ve kterém dochází k porušení a pohybuje se od mikroúrovně při vzniku a šíření poruch v krystalické mřížce až po mega úroveň při porušení na velkých plochách a pohybu mezi strukturními jednotkami. K tomu je třeba dodat, že frekvenční spektrum seizmické emise se s rostoucím objemem porušované zóny posunuje do oboru nízkých frekvencí. Uvolněná deformační energie doprovázející vznik mikrotrhlin a trhlin vyvolává elastické vlny, které se šíří horninovým prostředím z místa zdroje do okolí. Předmětem našeho zájmu jsou mega procesy, tj. procesy odpovídající vzniku trhlin řádové velikosti metrů až desítek metrů. Seizmické vlny jsou v tomto případě v nízkofrekvenčním oboru na hranici slyšitelnosti a v infrazvukovém oboru. Nízkofrekvenční seizmický signál pozorovaný po odstřelu (během několika minut) můžeme považovat za přímý vliv na deformaci svahu; pozdější emise seizmických vln budeme považovat za projev přirozené deformace svahu. Vzhledem k útlumu amplitudy seizmických vln se vzdáleností od zdroje a na-

stavené nízké citlivosti seizmografu (z důvodů trvalého seismického neklidu při těžbě v lomu), závisí úspěch sledování seismických emisí na umístění seizmografu v blízkosti předpokládaného porušení horniny.

Pro první konkrétní výzkum byl vybrán svah Jezerka v předpolí Lomu čs. armády, kde vybudovaný systém monitoringu může poskytnout údaje o deformacích svahu. Za překročení kritické rychlosti při odstřelu lze považovat ty případy, kdy v krátké době po odstřelu dojde v místě seismického měření k deformaci (horizontální nebo vertikální délkové změně). Doposud byla naše činnost zaměřena na ověření seismické registrační aparatury. Vertikální seismometr byl umístěn ve štole Jezerka ve vzdálenosti 65 m od ústí štoly za trhlinou na rozhraní sutí a krystalinika. Druhý kontrolní seismometr, který bude později použit pro měření horizontální složky pohybu ve štole, byl na povrchu u buňky monitoringu, kde je umístěno registrační a pomocné zařízení. Analogový inkoustový zapisovač má dvě registrační rychlosti: standardní 1 mm/s pro dlouhodobý nepřetržitý provoz 12 - 18 hodin a zvýšenou 10 mm/s pro zkrácený provoz. Prvá rychlost umožňuje určit ze záznamu maximální rychlost pohybu, ne však jeho frekvenci, druhá rychlost dává možnost vyhodnotit časový průběh seismických kmitů.

Na obr. 1 jsou záznamy nátrásných odstřelů v Lomu čs. armády při obou rychlostech. Záznamy seizmografu na povrchu pořízené s vyšší citlivostí jsou analogické.

Na obr. 2 je část záznamu mikroseismického neklidu v období sesuvu sutí v blízkosti štoly. Seizmograf ve štole zaznamenal první neklid v 5 h 31 min (UTC); neklid dosáhl největší velikosti v době od 5 h 37 min do 5 h 39 min a dozněl v 5 h 42 min. Zvýšený mikroseismický neklid na povrchu byl zaznamenán až v 5 h 40 min, maximální intenzitu měl mezi 5 h 41 min a 5 h 43 min. Obdobné případy, charakterizované menšími hodnotami, byly pozorovány již dříve (18. 1., 5., 18. a 22. února 1988). Od března tento jev nebyl sledován vzhledem k seiz-

44
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

11.1.1988

(10x482 kg Permon DAP-1,
vrty 20m/9m).

1 min

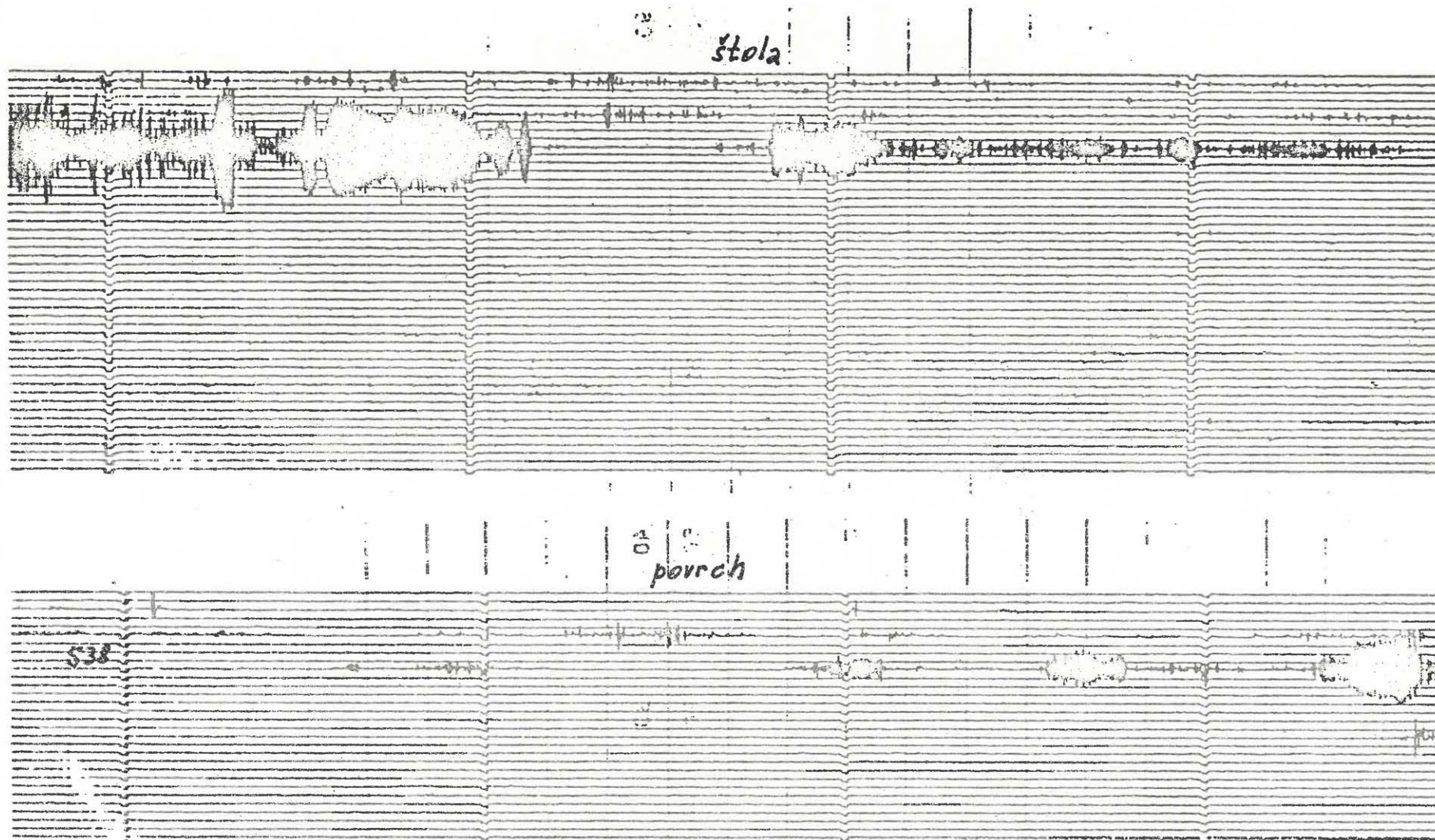
Obr.1. Seizmogramy nářasných
odstřelů ve VČSA (KU 75)
zaznamenané ve štole Jezerka
standardní a zvýšenou registrační
rychlostí.

1s

↓ C

4.3.1988

(10x440+330+220, 4725 kg
Permon DAP-1, 225 kg Ge-
lamon 30, vrty 18m/7m).



obr.2. Seizmický neklid dne 25.4.1988 (sesuv svahu u Jezerky).

mickému rušení při ražení retenční nádrže ve štole. Do té doby byla zaznamenána krátkodobá nízkofrekvenční emise seizmických vln bez předchozího odstřelu pouze jednou, a to 1. 2. 1988 ve 20 h 22 min; další obdobně vyhlížející jevy na záznamech jsou jiného původu: podle záznamu mikrobarografu ve Vysoké Peci se jedná o odezvy na tlakové vzdušné vlny ze zdrojů v atmosféře.

Závěr

Soustavná seizmická měření provedená v letech 1982 - 1987 ukázala, že ve sledované oblasti pokračuje přirozená seizmická činnost v oboru mikrozemětřesení, tj. pod hranicí účinků pozorovatelných lidskými smysly. Srovnání s modelem výskytu zemětřesení, odvozeným na základě dřívějších makroseizmických jevů potvrzuje, že roční četnosti zaznamenaných mikrozemětřesení jsou řádově shodné. Přihlédneme-li k tomu, že mezi otřesy s neznámým zdrojem mohou být i některé otřesy tektonického původu, pak skutečný počet přirozených otřesů bude větší. Z toho lze usoudit, že uvolňování tektonické energie probíhá v současnosti za podobných podmínek jako v minulosti a vznik silnějších lokálních zemětřesení nelze vyloučit. Pro matematické či fyzikální modelování maximálních účinků seizmických vln na svahy je možné použít hodnoty pohybu půdy pro maximální očekávanou intenzitu lokálního zemětřesení 6,5⁰ MSK-64. Při nejsilnějším zemětřesení roje v oblasti západních Čech z 21. 12. 1985 nebyla na celém území SHR překročena intenzita 5⁰ MSK-64. S ohledem na možnosti indikace vzniku silnějších zemětřesení na základě předtřesů a rojového charakteru lokálních zemětřesení pokládáme za účelné pokračovat ve stejném rozsahu v monitorování seizmicity oblasti.

V uvedeném období převažovala co do rozsahu a intenzity technická seizmicita. Zkušební seizmická měření odstřelů ve štole Jezerka prokázala vysokou spolehlivost aparatury.

Zařízení splňuje požadavky na nepřetržitý provoz a souběžné vyhodnocení dat. Zaznamenávané maximální rychlosti pohybu půdy ve srovnání se zjištěnými deformacemi svahu mohou poskytnout hodnoty kritické rychlosti in situ pro aktuální stav svahu a po doplnění údajů o technologii nátržných odstřelů i rozsáhlý materiál pro parametrizaci seizmických účinků nátržných odstřelů. V další etapě by bylo užitečné analyzovat podmínky pro zařazení náhlé nízkofrekvenční emise mezi varovné stavy a zpřesnit odhad rizika účinků lokálních zemětřesení na základě zjištěných účinků odstřelů.

Použitá literatura:

1. Drozd, K.: Kontrola svahových pohybů - kontrolní systémy - monitoring.
Sborník "Stabilitní řešení svahů a jejich zabezpečení", 34-48. VÚHU Most 1981
2. Procházková, D., Tobyáš, V., Knaislová, D.: Earthquakes in the region of the open-pit mines in the Most area (ČSSR).
Travaux Inst. Géophys. Acad. Tchécosl. Sci. No 592, Travaux Géophysiques 1984, 237 - 250. Academia, Praha 1987.
3. Procházková, D., Tobyáš, V., Knaislová, D.: Zemětřesení v oblasti povrchových dolů na Mostecku. Geologický průzkum, 26, 1984, č. 10, s. 276 - 279.
4. Drozd, K., Rybář, J.: Indukovaná seizmicita při povrchové těžbě hnědého uhlí.
Geologický průzkum, 25, 1983, č. 2, s. 38 - 40
5. Fischl, P.: Trhací práce na dolech v SHR.
Sborník "Hnědé uhlí 1982", sekce povrchové dobývání, s. 62 - 79. Dům techniky ČSVTS, Ústí nad Labem 1982.
6. Tobyáš, V., Fiedler, J., Knaislová, D., Procházková, D.: Magnitudes of detectable and localizable shocks in NW Bohemia. Studia geoph. et geod. 29, 1985, s. 68 - 74.