

JAN BURDA, VÍT VILÍMEK

## VLIV KLIMATICKÝCH FAKTORŮ A KOLÍSÁNÍ HLADINY PODZEMNÍ VODY NA STABILITU ANTROPOGENNÍCH SVAHŮ KRUŠNÝCH HOR

**BURDA, J., VILÍMEK, V. (2010): The influence of climate effects and fluctuations in groundwater level on the stability of anthropogenic foothill slopes in the Krušné Hory Mountains, Czechia. *Geografie*, 115, No. 4, pp. 377–392.** – At the beginning of the 1980s, leveling circuits  $Z_{2b}$  11 and  $Z_{2b}$  3 (later also  $Z_{2b}$  12) were monitored as a means of confirming the hypothesis concerning the Krušné Hory Mountains uplift. Contemporary geodetical monitoring focuses on side slopes formed by Quaternary sediments and Tertiary clstones. The stability of these anthropogenic slopes is implicated by hillside inclination, geological and geomorphological settings as well as climatic factors. The main objective of this study is to geomorphologically interpret the geodetical monitoring of the ČSA open-pit mine's hazardous side slopes and, in addition, to prove the influence of climatic factors on slope stability.

**KEY WORDS:** mass movement – geodetical monitoring – triggering factors – Krušné Hory Mountains.

Práce vznikla jako součást státního úkolu MŠMT 1M06007 „Centrum výzkumu integrovaného systému využití vedlejších produktů těžby, úpravy a zpracování energetických surovin“ a jako součást grantového projektu GA UK 155610 „Hodnocení rozšíření a dynamiky recentních svahových pohybů v lokalitě Jezeří, Krušné hory“. Článek vznikl také s přispěním výzkumného záměru geografické sekce PřF UK v Praze MSM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“.

### 1. Úvod

V souvislosti s rozvojem povrchové těžby hnědého uhlí v Mostecké pánvi byla v 70. a 80. letech 20. století řešena otázka stability jihovýchodních svahů Krušných hor (např. Rybář a kol. 1975, Marek 1983). Součástí byl i dlouhodobý geodetický monitoring nivelačních pořadů  $Z_{2b}$  11 a  $Z_{2b}$  3, později i pořadu  $Z_{2b}$  12. Geomorfologické interpretaci naměřených hodnot se v minulosti věnovala řada autorů (např. Kalvoda a kol. 1990; Kalvoda a kol. 1994; Stolínová, Vilímek 2003). Od začátku 90. let pravidelná měření ustala a až do současnosti jsou prováděna sporadicky.

Pozornost současných geodetických měření se soustřeďuje spíše na problémové partie kvartérních sedimentů, které tvoří úpatní antropogenní svahy Krušných hor a jsou náchylné k sesouvání. Tyto svahy jsou od roku 2005 monitorovány pomocí 45 geodetických bodů, které jsou v pravidelném intervalu zaměřovány totální stanicí umístěnou v prostoru lomu Československé armády (dále ČSA).

Díky datům z nově vzniklé automatizované meteorologické stanice Jezeří (280 m n. m.) lze výsledky nových geodetických měření porovnat se srážkami přímo ze zájmové lokality, a tak posoudit přímý vliv klimatických faktorů na rozvoj svahových pohybů v dané lokalitě. Rybář a Novotný (2005) poukazují na skutečnost, že krátkodobé intenzivní deště mohou vést k rozvoji svahových pohybů i v období, které je dlouhodobě srážkově podprůměrné. Krátkodobé extrémní srážky proto často zapříčiňují lavinovité výskyty sesuvů v rozsáhlých oblastech. K rozvoji svahových pohybů mnohdy naopak dochází i s výrazným zpožděním oproti kulminaci dlouhodobé srážkové činnosti (Rybář 2006), což je typické především pro středně hluboce až hluboce založené sesuvy. Pro hodnocení dlouhodobé srážkové bilance budou proto použity údaje z klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) Boleboř (640 m n. m.) a Kopisty (240 m n. m.). Cílem této práce bylo prokázat vliv klimatických faktorů jako primárního iniciačního faktoru, který vede k rozvoji svahových pohybů ve studované lokalitě.

## **2. Přehled dosavadních výzkumů**

### **2.1. Charakteristika lokality**

Zájmová lokalita se nachází na styku Krušných hor a Mostecké pánve. Geologické a fyzickogeografické poměry zájmového území byly již mnohokrát podrobně popsány (např. Váně 1960; Král 1968; Škvor 1972; Brus, Hurník 1973; Malkovský 1977; Hurník 1982; Zmítka 1983; Marek 1983; Malkovský a kol. 1985; Kopecký a kol. 1985; Vilímek 1992; Vilímek 1994; Horáček 1994). Specifikem oblasti je rozsáhlý antropogenní reliéf. Těžba uhlí v lomu ČSA postoupila hluboko do svahu Krušných hor a vytváří vysoké antropogenní svahy, které přímo navazují na strmé zlomové svahy kateřinohorské klenby. Předmětem zájmu jsou právě antropogenní svahy v okolí zámku Jezeří (obr. 1, 2, 3). V prostoru bývalého zámeckého arboreta byl ponechán stabilizační pilíř, jenž je vymezen územním ekologickým limitem těžby v Severočeské hnědouhelné pánvi z roku 1991 a má zamezit rozvolnění tektonicky porušeného svahu krystalinika v okolí zámku Jezeří, k němuž by mohlo dojít odlehčením paty svahu (např. Pichler 1998, Burda 2008).

Pánevní souvrství je zde tvořeno mocnými lakustrinními sedimenty miocénního stáří. Jílové souvrství má přibližnou mocnost 200 m a navazuje na uhelnou sloj mocnou 20–35 m. Uhlenná sloj je od pánevního krušnohorského krystalinika oddělena svrchně paleogenními a spodně neogenními klastickými sedimenty (Král 1968; Brus, Hurník 1973; Malkovský a kol. 1985). Ve sledované oblasti mezi Mosteckou pánví a Krušnými horami ostře prochází linie krušnohorského zlomu; mocnost této poruchové zóny odhadl Marek (1983) na 40 m.

Vlastní stabilizační pilíř, který je předmětem zájmu současných prací, je pokryt kvartérními proluviálními a deluviálními sedimenty. Řada geomorfologických a inženýrsko-geologických prací dokazuje náchylnost těchto kvartérních sedimentů ke vzniku svahových pohybů (Bůžková 1994, Burda 2008) a ve výjimečných případech dochází k rozvoji hlubokých sesuvů napříč celým pánevním souvrstvím (Pichler 1998; Valeš 1998; Rybář, Novotný 2005).

## 2.2. Měření nivelačních pořadů

První velmi přesná nivelace, jež měla za cíl registrovat stabilitní poměry jihovýchodního svahu Krušných hor, byla zřízena a provozována již v 80. letech minulého století. Zvláštní nivelační pořad  $Z_2b\ 11$  (a jeho odbočky  $Z_2b\ 10$  a  $Z_2b\ 3$ ) spojoval zarovnané povrchy vrcholové oblasti Krušných hor s areálem zámku Jezeří a s úpatím zlomového krušnohorského svahu. Sledování započala na jaře roku 1983 a probíhala v pravidelných etapách do jara 1989. Vztahným bodem byla hloubková stabilizace v Nové Vsi v Horách (Kalvoda a kol. 1994). V roce 1990 byla měření redukována pouze na úsek v prostoru zámku Jezeří a vrchu Jezerka a současně byl tento zbytek pořadu  $Z_2b\ 11$  a  $Z_2b\ 3$  doplněn o měření na  $Z_2b\ 12$ . Výchozím bodem byla stabilizace Červený Hrádek. Tato měření byla započata roku 1988, ovšem neprobíhala v pravidelných obdobích roku jako u zvláštního nivelačního pořadu  $Z_2b\ 11$  (jaro a podzim), což je vzhledem k prokázaným sezónním výkyvům ve výškové poloze bodů (Kalvoda a kol. 1990) značnou nevýhodou. Vzhledem k tomu, že se oba měřené pořady v úseku zámek Jezeří – vrch Jezerka prostorově překrývaly a byla zde v období podzim 1988, jaro 1989 a 1990 i časová shoda, pokusili jsme se o porovnání (Stolínová, Vilímek 2003). Nikoliv však z hlediska absolutní hodnoty pohybů, neboť oba pořady mají jiné vztahné body, ale o porovnání trendů pohybů, jež signalizují recentní geomorfologické procesy v dané části pořadu. A to zejména tehdy, když se jedná o celou skupinu geodetických bodů a současně bylo provedeno vyhodnocení geomorfologických poměrů v nejbližším okolí bodů i geomorfologické mapování širší oblasti jihovýchodního krušnohorského svahu (Vilímek 1995, 1998). Bylo též provedeno i ocenění kvality stabilizace měřených geodetických bodů – viz metodika Kalvoda a kol. (1990).

Vysvětlení vertikální pohybů z pravidelných měření na pořadu  $Z_2b\ 11$  z 80. let je potřeba hledat v příčinách klimatických, tektonických a antropogenních. Přitom bylo současně možné vytipovat oblasti odlišné míry porušení přípovrchové části zemské kůry v reakci na současné geodynamické procesy (Kalvoda a kol. 1990). Geomorfologická interpretace opakovaných nivelačních měření z let 1988 až 1998 (z kombinace pořadů část  $Z_2b\ 11$ ,  $Z_2b\ 12$  a  $Z_2b\ 3$ ) přinesla překvapivě vysoké hodnoty zdvihů části sledovaných bodů, a to až přes 2 mm/rok. Tyto výsledky ovšem mohly být do určité míry zkresleny zpochybněnou kvalitou stabilizace výchozího bodu u Červeného Hrádku či možností nahromadění systematické chyby v důsledku překonávání velkých relativních převýšení v průběhu měření (Stolínová, Vilímek 2002). Dalším možným vysvětlením je i již dříve diskutovaný elastický zdvih, jakožto reakce na odtěžené hmoty v pánevní oblasti (Kalvoda a kol. 1990). V každém případě i tato již méně kvalitní etapa nivelačních měření (1988 až 1998) přinesla potvrzení sezónního kolísání výškové úrovně nivelačních bodů a společné reakce skupiny bodů v odezvě na recentní geomorfologické procesy.

## 3. Metody

### 3.1. Geodetický monitoring

Tato práce se zaměřuje na oblast kvartérních sedimentů, které tvoří boční svahy lomu ČSA a opěrného pilíře pod zámkem Jezeří. Podklad pro analýzu

tvoří data geodetického monitoringu bočních svahů lomu ČSA, který je realizován od 21. června 2005 a v současné době sleduje nejen prostor pilíře Jezeří, ale i partie svahu albrechtické výsypky. Na rozdíl od předchozích geodetických měření se nejedná o nivelační pořad, ale o kontinuální zaměřování vybraných bodů ve svahu (Brown a kol. 2007). Na ocelových pažnicích o průměru 50 mm a o celkové délce 3,5 m jsou umístěny odrazné hranoly. Pažnice jsou v hloubce 2 m zajištěny betonovou směsí nebo částečným zásypem s kamenivem frakce 8–16 mm a betonovou manžetou (Stanislav, Blín 2007).

Souřadnice odrazných hranolů  $X$ ,  $Y$ , a  $Z$  jsou zaměřovány v hodinovém intervalu totální stanicí ATS Leica TCR 2003A, která je umístěna v kóji na betonovém fundamentu ve vyuhleném pánevním dně (Stanislav, Blín 2007). Stanice při každém měření zaměřuje i polohy čtyř stabilních referenčních bodů, které jsou umístěny mimo dolové pole lomu ČSA na stožárech obslužných budov. Průběžným zaměřováním čtyř referenčních bodů je možné určit hodnoty posunu jednotlivých monitorovaných bodů (obr. 4). K dispozici jsou hodnoty relativních a absolutních měsíčních 2D a 3D posunů. Aby byla podchycena i vertikální složka pohybu, použili jsme hodnoty absolutních 3D posunů, které se počítají jako vektorová hodnota posunu bodu v prostoru.

Střední chyba hodinového měření je v závislosti na vzdálenosti (1500 až 2000 m) asi 20–30 mm (ústní sdělení pracovníků VÚHU a. s., Brown a kol. 2007, Hampacher a kol. 2008). Jelikož je chyba při měření poměrně významná, bylo třeba pro korelaci s klimatickými údaji vybrat body, které svým posunem přesahují chybu měření. Proto bylo ze 45 aktuálně sledovaných geodetických bodů vybráno celkem 10 bodů (obr. 5). Jedná se o body č. 8010, 8011, 8016, 8020, 8026, 8027, 8029, 8041, 8079, 8119, jejichž celkový 3D posun od počátku měření překročil zvolenou hodnotu (byly zvoleny body, jejichž absolutní 3D posun  $\geq 300$  mm; tato hranice byla zvolena empiricky tak, aby bylo možné vybrat vhodný počet reprezentativních bodů s hodnotami posunů, které výrazně přesahují chybu měření). Byly tedy vytipovány body s největším absolutním posunem od začátku měření.

Některé body byly v průběhu monitoringu zničeny svahovými pohyby a následně musely být proto nahrazeny body novými. Dalším kritériem výběru byla ucelenost měření, při němž jsme vybírali body s nepřetržitým měřením od jejich založení do 31. prosince 2009. Výše zmíněné geodetické body byly založeny 21. června 2005, jen bod 8079 byl založen 13. července 2006 a bod 8119 až 25. září 2007.

### 3.2. Klimatologická data

Údaje o teplotách a srážkách byly získány z automatické meteorologické stanice Jezeří provozované pracovníky VÚHU a. s., která je umístěna nad zámeckým arborem a je tedy v bezprostřední blízkosti monitorované oblasti (obr. 5). K dispozici jsou hodinová měření srážek, teploty vzduchu, směru a rychlosti větru. Technické problémy způsobily, že údaje jsou neúplné v období listopad 2007–únor 2008 a červen 2008–prosinec 2008. Data z meteorologické stanice Jezeří jsme využili k hodnocení vlivu krátkodobých srážek a přívalových dešťů.

Z klimatologických stanic ČHMÚ Boleboř (asi 7 km od zámku Jezeří) a Kopystky u Mostu (asi 8 km od zámku Jezeří) byly použity měsíční srážkové úhrny.

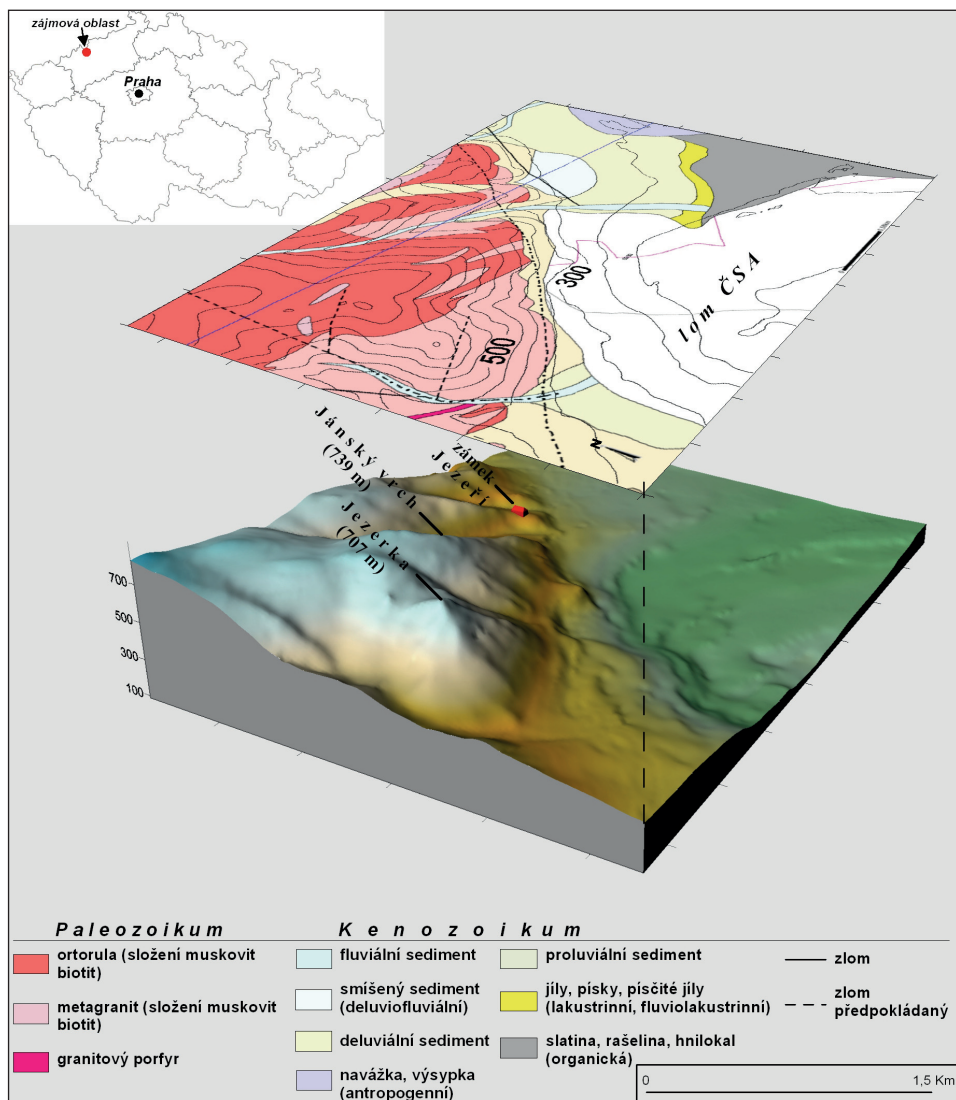




Obr. 1 – Stabilizační pilíř při úpatí tektonicky porušeného krušnohorského svahu pod zámekem Jezeří. Charakteristický je sesuvný typ reliéfu v oblasti jihozápadně orientovaných svahů, v pozadí dolové pole lomu ČSA. Foto: J. Burda 2010.

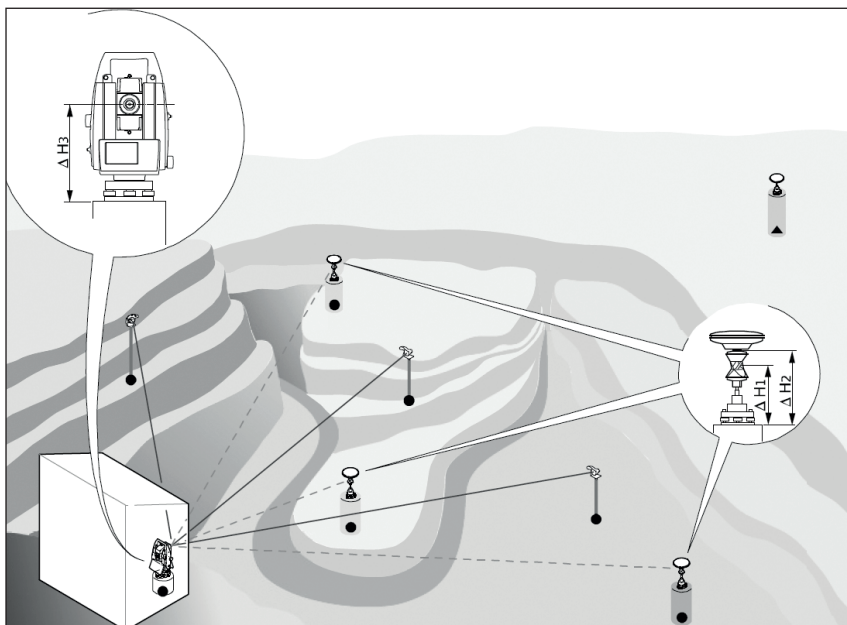


Obr. 2 – Odlučná oblast proudových sesuvů v oblasti jihozápadně orientovaných svahů. Foto: J. Burda 2010.

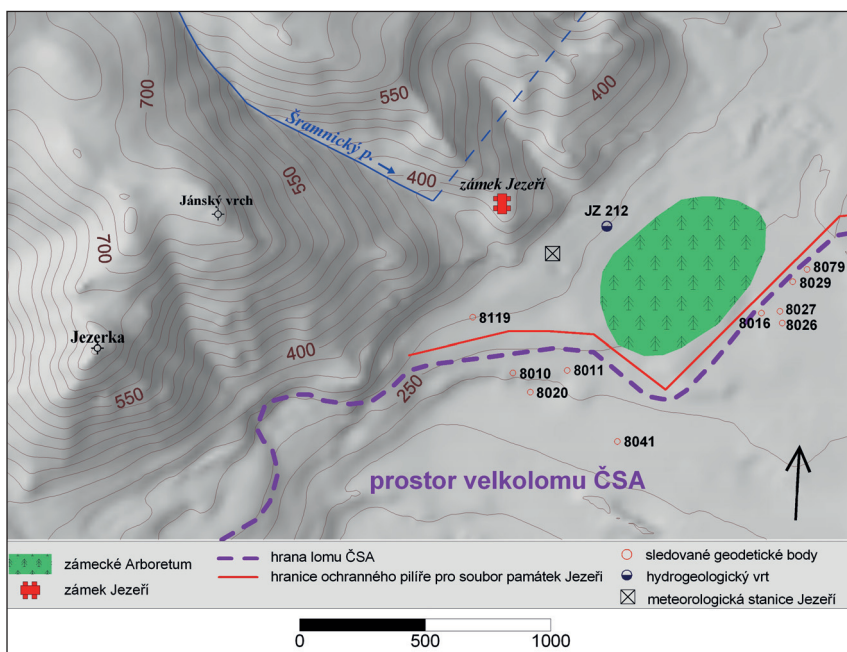


Obr. 3 – Obecný topografický a geologický přehled zájmové oblasti (geologický podklad ČGS).

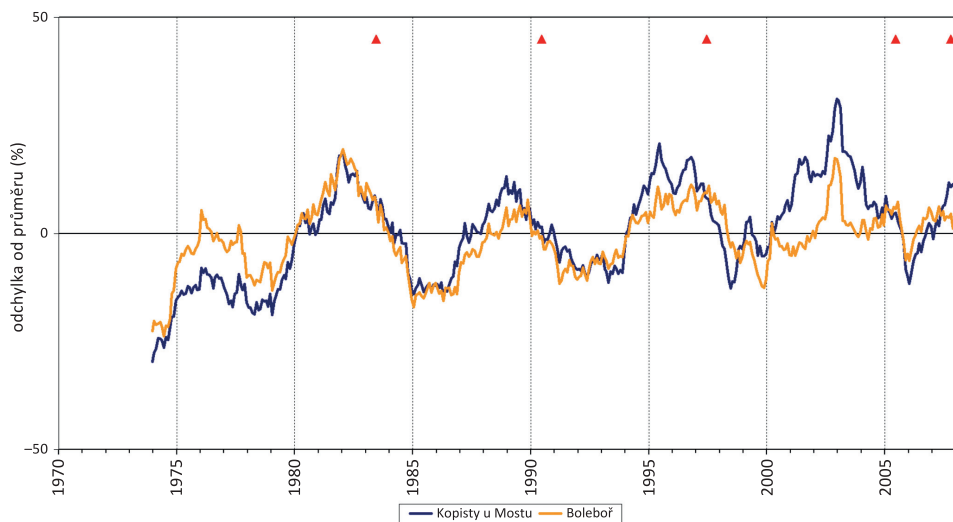




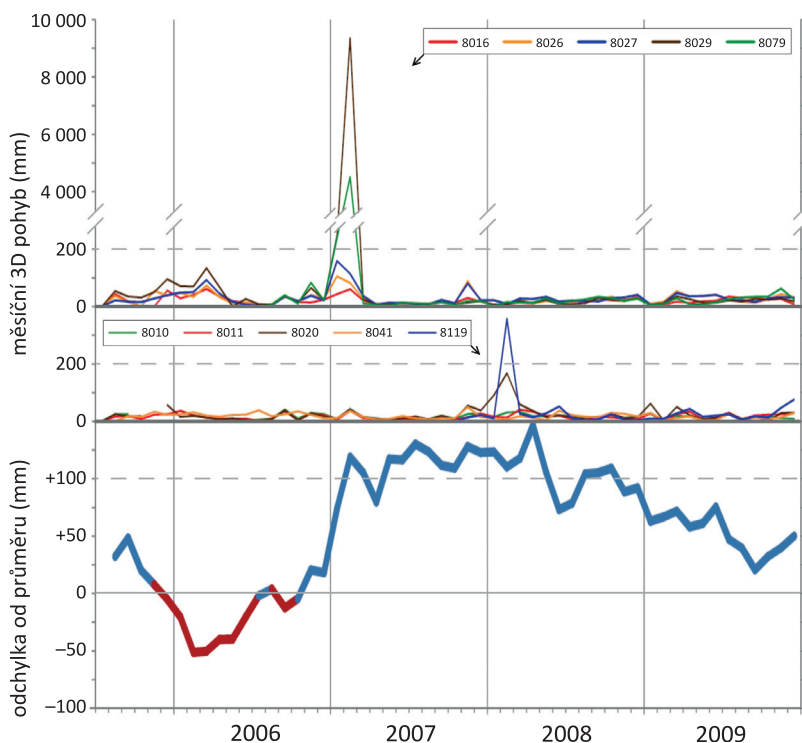
Obr. 4 – Princip geodetického monitoringu lomových svahů, poloha totální stanice a konfigurace sledovaných a referenčních bodů, které jsou osazeny odraznými hranoly (Brown a kol. 2007).



Obr. 5 – Přehledová mapa znázorňující lokalizaci deseti sledovaných geodetických bodů v prostoru stabilizačního pilíře pod zámek Jezeří.



Obr. 6 – Odchylka od dlouhodobých měsíčních průměru srážek shlazená 36měsíčním klouzavým průměrem, značky představují vznik hluboce založeného sesuvu ve sledované lokalitě.



Obr. 7 – Porovnání posunů vybraných geodetických bodů na jv. a jz. svazích opěrného pilíře se součtovou čarou rozdílů mezi měřeními a průměrnými měsíčními úhrny srážek na meteorologické stanici Jezeří (chybějící údaje byly doplněny záznamy ze stanice Kopisty).

Ty byly využity k hodnocení dlouhodobé srážkové bilance. Získaná klimatologická data byla porovnána s úrovní hladiny podzemní vody ve vrtu JZ212, který je situován pod silnicí spojující zámek Jezeří a Černice, tedy ve vrstvách pánevních sedimentů (Chán a kol. 2009). K dispozici jsou údaje za posledních pět let.

#### 4. Výsledky

V kombinaci s místními geomorfologickými a geologickými poměry jsou klimatické faktory obecně považovány za hlavní přirozený iniciační impuls vedoucí k destabilizaci svahů. V této lokalitě tuto skutečnost implikovali i Kalvoda a kol. (1994), když si všímají cykličnosti ve vertikálních změnách pohybu bodů nivelačního pořadu *Z<sub>2</sub>B 11* v korelaci se změnou ročního období (podzim 1983–jaro 1989). Konstatují, že většina bodů nivelačního pořadu vykazuje rostoucí tendence na jaře, což je důsledek jarních srážek, tání sněhu a následného nasycení masívu vodou. Velký vliv klimatických faktorů na stabilitu svahů zde uvádějí i Rybář a kol. (1975) a Rybář a Novotný (2005), poukazují však na provázanost aktivity svahových pohybů a dlouhodobých klimatických trendů. Zejména hluboce založené sesuvy reagují na víceleté zvýšené srážkové úhrny se zpožděním (v případě sesuvu bočních svahů pod Jezerkou roku 1983 došlo k pohybům se zpožděním jednoho a půl roku; obr. 6).

Zvolené geodetické body byly na základě polohy ve svahu opěrného pilíře dále rozděleny do dvou skupin. Body 8016, 8026, 8027, 8029 a 8079 odrážejí poměry sanovaných jihovýchodně orientovaných svahů opěrného pilíře. Nesanované svahy pilíře s jihozápadní orientací jsou aktuálně partií s největší dynamikou svahových pohybů. Body 8010, 8011, 8020, 8041 a 8119 reflektují poměry této části svahu.

##### 4.1. Jihovýchodně orientované svahy

Obrázek 7 přehledným způsobem prezentuje hodnoty měsíčních 3D posunů jednotlivých bodů (8016, 8026, 8027, 8029, 8079). Hodnoty posunů v grafu oscilují okolo 20–30 mm, což jsou hodnoty v rozmezí chyby měření. Přesto můžeme spolehlivě vymezit měsíce, v nichž došlo k rozvoji svahových pohybů a signifikantním posunům monitorovaných bodů. Jedná se o období konce roku 2005 a roku 2006 (údaje z prvních měsíců měření je třeba brát s rezervou, neboť data jsou neúplná a hodnoty měsíčních posunů mohou být zatíženy chybami vzniklými v iniciační etapě měření – Stanislav, Blín 2007). Pohyby ze září a listopadu roku 2006 indikovaly progresivně se vyvíjející sesuv. Dne 10. února 2007 skutečně došlo k sesuvu v dílčí části bočního svahu, jehož kubaturu odhadl Pichler (2008) na 110 tis. m<sup>3</sup>. Pohyb byl zachycen několika body, ale pouze stabilizace bodů 8029 a 8079 nebyla během sesuvu zničena. V listopadu roku 2007 pozorujeme u některých bodů opět vzrůst hodnot, celkově se ale hodnoty posunů drží v rozmezí asi 20–30 mm. Během roku 2007 byly v této části svahu pilíře dokončeny sanační práce, které zřejmě vedly k celkové stabilizaci svahu.

Rekognoskace terénu i provedené studie (Rybář, Novotný 2005; Pichler 2008) prokázaly v oblasti jihovýchodních svahů pilíře existenci hluboce a střed-



ně hluboce založených sesuvů. Proto je vhodné vztahovat vznik svahových pohybů v těchto svazích k anomáliím v dlouhodobých srážkových úhrnech. Na obrázku 6 je zobrazena odchylka od dlouhodobých měsíčních průměru srážek vypočtená z hodnot naměřených na stanicích Boleboř a Kopisty u Mostu. Charakteristický je cyklický charakter, kdy křivka osciluje okolo průměrných hodnot. V grafu jsou znázorněny i hluboce založené sesuvy z minulých let 1983, 1990, 2005 a 2007.

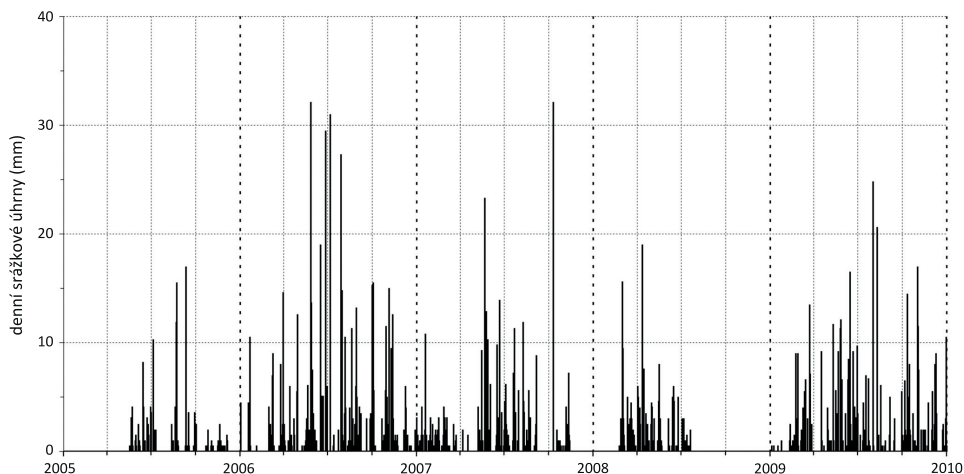
Oživení pohybů na jaře roku 2007, které je patrné z obrázku 7, lze dát do souvislosti s dlouhodobým trendem srážek (obr. 6 a obr. 7). Tento svah byl již v roce 2005 postižen rozsáhlým hluboce založeným sesuvem, který byl iniciován dílčí kulminací srážek během května a června (Rybář, Novotný 2005; Burda 2008). Jako faktory iniciující oživení pohybů v letech 2006 a 2007 se projeví zvýšené měsíční úhrny srážek, tání sněhové pokrývky a následný vzestup hladiny podzemní vody. Vlastní sesuv z 10. února 2007 byl potom iniciován srážkovou kulminací během ledna a února roku 2007 (obr. 7).

#### 4.2. Jihozápadně orientované svahy

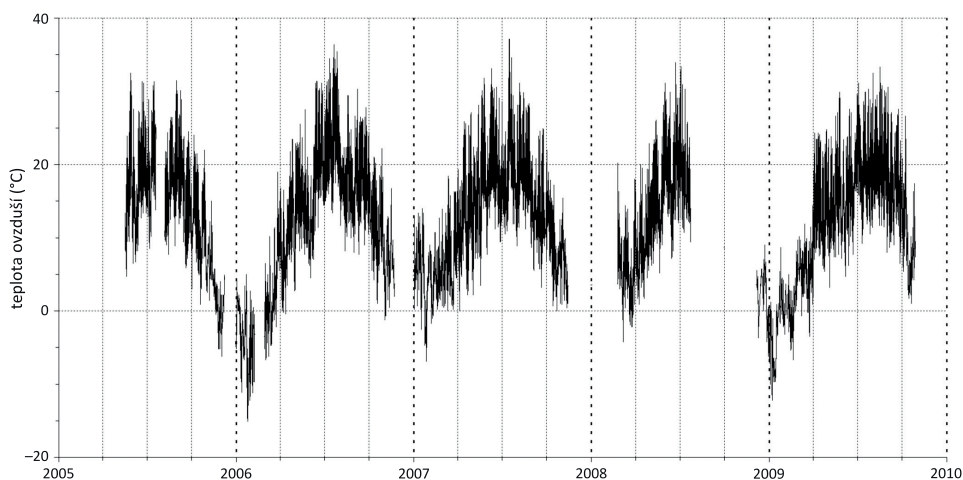
Na rozdíl od sanovaných jihovýchodních svahů představují jihozápadní svahy oblast významně modelovanou svahovými pohyby. Morfologicky je zde charakteristický sesuvný typ reliéfu (obr. 1 a obr. 2). Obrázek 7 prezentuje posuny bodů (8010, 8011, 8020, 8041, 8119), kterými je osazena tato část svahu. Hodnoty opět oscilují okolo 20–30 mm, přičemž mírný vzestup hodnot k hranici 50 mm sledujeme v únoru 2007. Tento trend je obdobný jako v předchozím případě, jen celkové posuny nedosahují tak významných hodnot. Další nárůst hodnot je patrný během listopadu 2007 a od začátku roku 2008 dochází u bodů 8119 a 8020 ke skokovému nárůstu naměřených hodnot. V listopadu 2007 a dubnu 2008 skutečně došlo k progresi proudových sesuvů (jak uvádí např. Pichler 2008). K dalšímu, ale již méně výraznému, oživení pohybů došlo opět během prvního kvartálu roku 2009.

Pohyby sledované na bodech situovaných na jihozápadních nesanovaných svazích odrážejí aktuální pohyby sesuvů majících charakter zemních proudů; tyto sesuvy vznikají v hluboce založené sesuvné oblasti z 90. let. Podobné typy svahových pohybů jsou vázány na vznik dočasně zvodnělých horizontů v důsledku saturace povrchových vrstev srážkami. Proto je nutné hledat příčinu vzniku svahových pohybů v měsíčním a denním chodu srážek (Rybář 2006). Pro tyto účely lze vhodně využít data z meteorologické stanice provozované VÚHU a. s. poblíž zámeckého arboreta (obr. 7, 8, 9).

U vybraných bodů (obr. 7) pozorujeme nárůst hodnot od přelomu října a listopadu 2007. Toto oživení pohybů lze dát do souvislosti s přívalovými srážkami z 10. října 2007 (obr. 8), kdy mezi 13. a 14. hodinou spadlo 32,1 mm srážek. Po krátkém zimním uklidnění pohybu došlo v roce 2008 ke skokovému zvýšení hodnot posunů. Jelikož klimatologická data z roku 2008 nejsou kompletní, nelze chování sesuvu porovnávat se srážkovými úhrny. Aktivitu pohybu lze dát do souvislosti s jarním táním sněhové pokrývky a celkově vysokou úrovní hladiny podzemní vody během první poloviny roku 2008. Jarní oživení pohybů je tedy spojeno s jarním oteplením, které vede k tání a vzestupu hladiny podzemní a následné mobilizaci sesuvného materiálu.



Obr. 8 – Denní srážkové úhrny na meteorologické stanici Jezeří. Pro období listopad 2007–únor 2008 a červen 2008–prosinec 2008 nejsou data dostupná.



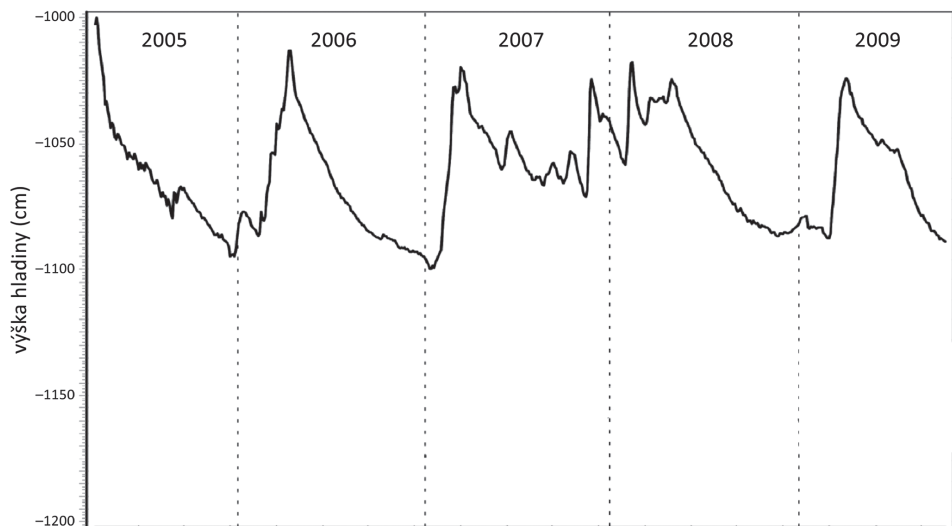
Obr. 9 – Hodinový vývoj teplot na meteorologické stanici Jezeří.

Jako iniciační faktor pohybů z let 2007 a 2008 se projeví příválové srážky z 10. října 2007, přičemž obdobné hodnoty srážek byly naměřeny rovněž během jara a léta předcházejícího roku, ale k oživení sesuvu nevedly. Jako možné vysvětlení se jeví nízká hladina podzemní vody (obr. 10) během zmiňovaného období. Naopak koncem roku 2007 a začátkem roku 2008 byla změřená úroveň hladiny podzemní vody ve vrtu JZ 212 velmi vysoká, a tak krátkodobé intenzivní srážky snadno vedly k promáčení povrchu a oživení pohybu.

## 5. Diskuze výsledků

Analýzou obrázku 7 nalezneme období, kdy došlo k oživení pohybů v obou lokalitách. Jedná se o září a listopad 2006 a únor 2007, ale naměřené hodnoty jsou u bodů na jihozápadních svazích podstatně nižší. Naopak oživení pohybů na jaře roku 2009 se zřetelněji projevilo právě na jihozápadních svazích. Jelikož je chyba měření dost významná, lze dávat do souvislosti s klimatickými faktory spolehlivě pouze ty pohyby bodů, jejichž posun přesahuje chybu měření. Jako hlavní iniciační faktor se projevila kombinace srážkových úhrnů a zvýšené úrovně hladiny podzemní vody. Detailní studium přímé závislosti posunu bodů na klimatických vlivech ale není možné, jelikož kvůli chybě měření nejsme schopni identifikovat malé pohyby v iniciační fázi sesouvání. Při vyhodnocování těchto měření je stále třeba mít na zřeteli, že tento geodetický monitoring byl navržen ke sledování pohybů v řádech cm, nikoliv mm, tedy nikoliv za účelem základního výzkumu, ale jako systém včasné výstrahy, který má zamezit případným škodám na báňské technice v průběhu těžby. Monitoring je rovněž navržen pro sledování celého bočního (jihovýchodního) svahu lomu, proto konfigurace bodů, vzhledem k distribuci svahových deformací, rovněž není plně dostačující.

Pro posuzování závislosti vzniku hlubokých sesuvů z minulých let a dlouhodobých srážek sice nebylo možné využít data z meteorologické stanice Jezeří (krátký časový rozsah měření), ale jako dostačující se ukázaly údaje z klimatologických stanic Boleboř a Kopisty u Mostu. Trend křivek je prakticky shodný a předpokládaný vztah progresu sesuvů a dlouhodobých srážek, tak jak jej popsali Rybář a Novotný (2005) a Rybář (2006), se potvrdil. Přínos meteorologické stanice Jezeří spatřujeme především při posuzování faktorů, které vedou ke vzniku proudových sesuvů na jihozápadních svazích pilíře. Dostupnost klimatologických dat s hodinovým krokem prokázala náchylnost těchto svahů



Obr. 10 – Výška hladiny ve vrtu JZ212 E, od 24. března 2005 do 9. října 2009 (Chán a kol. 2009)

ke vzniku výše zmiňovaných sesuvů v důsledku krátkodobých extrémních srážek. Výpadky měření během listopadu 2007–února 2008 a června 2008–prosine 2008 však nelze nahradit daty ze stanic Boleboř či Kopisty. Pro hodnocení přívalových srážek by byly hodnoty z několik kilometrů vzdálených stanic nereprezentativní.

Přes výše zmíněné nedostatky lze považovat zjištěné výsledky za relevantní. Očekávaná závislost hlubokých sesuvů na dlouhodobé srážkové bilanci a proudových sesuvů na krátkodobých srážkových extrémech se prokázala. Jako další rozhodující faktor podmiňující vznik či oživení sesuvu se ukázala výška hladiny podzemní vody.

## 6. Závěr

Ze 45 geodetických bodů, jejichž prostorové souřadnice  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  jsou pravidelně měřeny v hodinovém intervalu, bylo vybráno celkem 10 bodů, jejichž absolutní posun od počátku měření (21. červen 2005) přesáhl 300 mm. Měsíční hodnoty posunu bodů jsou zobrazeny v obrázku 7. Z grafu lze vysledovat, že k oživení svahových pohybů dochází často v prvním čtvrtletí roku. K obdobným závěrům došli i Kalvoda a kol. (1990, 1994), když vertikální pohyby bodů nivelačních pořadů dávali do souvislosti s jarním táním. Ze vzájemného porovnání všech grafů (obr. 6–10) je patrná souvislost mezi vznikem či oživením svahových pohybů a klimatickými faktory, které přispívají k iniciaci pohybu. Zároveň se prokázalo, že není možné přesně stanovit jeden dominantní spouštěcí impuls, který vede k rozvoji sesuvu. Při hodnocení podmínek, při nichž zde svahové pohyby vznikají, je třeba uvažovat o kombinaci vlivu více faktorů.

Odlišně je nutno přistupovat k hodnocení jihozápadních a jihovýchodních svahů opěrného pilíře v závislosti na tom, o jaký typ svahového pohybu jde a jak hluboce je založený. Na stabilních sanovaných jihovýchodních svazích epizodně dochází k rozvoji hluboce založených sesuvů. Potvrdilo se, že hluboce založené svahové pohyby vznikají se zpožděním až dvou let po výrazných anomáliích v dlouhodobé srážkové bilanci (obr. 6), přičemž k rozvoji těchto hlubokých sesuvů dochází v období se zvýšenou hladinou podzemní vody vlivem zvýšených měsíčních srážkových úhrnů. Prokázalo se, že pro hodnocení dlouhodobé srážkové bilance jsou dostačující data z klimatologických stanic ČHMÚ Kopisty u Mostu a Boleboř.

Nesanované jihozápadní svahy jsou modelovány sesuvy, které mají proudový charakter. Tyto svahy se jeví jako senzitivní na přívalové srážky. Zejména v období zvýšené hladiny podzemní vody dochází k rychlé saturaci povrchu atmosférickými srážkami a následnému rozvoji sesuvu. Pro hodnocení hodinových a denních srážek se jako vhodné ukázalo využití dat z meteorologické stanice Jezeří. Jelikož se jedná o svahy zatím nesanované, nelze v budoucnu vyloučit další rozvoj proudových sesuvů v důsledku krátkodobých srážkových extrémů. V budoucnu zde však nelze vyloučit ani oživení hlubokých deformací, které by mohly zasáhnout nejen kvartérní sedimenty, ale i jíly pánevního souvrství, tak jak tomu bylo v případech sanovaných jihovýchodních svahů.

*Upřímný dík patří ing. Dagmar Malé za přípravu podkladových dat a ing. Evženu Pichlerovi, CSc. za cenné připomínky při zpracování této práce.*

## Literatura:

- BROWN, N., KALOUSTIAN, S., ROECKLE, M. (2007): Monitoring of Open Pit Mines using Combined GNSS Satellite Receivers and Robotic Total Stations. Uživatelská příručka, Leica-Microsystems, c2010, <http://www.leica-geosystems.com/en/>.
- BRUS, Z., HURNÍK, S. (1973): Geografie. In: Příroda Mostecká. Severočeské nakladatelství, Ústí nad Labem, s. 25–60.
- BŮŽKOVÁ, H. (1994): Inženýrsko-geologický a hydrogeologický průzkum předpolí uhelného velkolomu při patě Krušných hor. Sborník geologických věd, ŘHIG, 20, Praha, s. 5–8.
- BURDA, J. (2008): Hodnocení dynamiky recentních svahových pohybů v lokalitě Jezeří – po provedeném dendrogeomorfologickém výzkum. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 107 s.
- HAMPACHER, M., JIŘÍKOVSKÝ, T., KOSKA, B. (2008): Automatizovaný monitoring bočních svahů velkolomu ČSA. Odborný posudek ČVUT v Praze, 20 s.
- HORÁČEK, M. (1994): Srovnání poznatků o průzkumných důlních dílech mezi Jezerkou a Horním Jiřetínem v Krušných horách. Sborník geologických věd, ŘHIG, 20, Praha, s. 45–51.
- HURNÍK, S. (1969): Příspěvek ke geologické problematice tzv. Komořanského jezera. In: Příroda Mostecko-Litvínovsko, Regionální studie, č. 6, Dialog, Most, s. 5–4.
- HURNÍK, S. (1982): Krušnohorský zlom a jeho interpretace. Mineralogie a geologie, 28, č. 4, s. 445.
- CHÁN, B., MRLINA, J., SEIDL, M., POLÁK, V., SKALSKÝ, P. (2009): Monitorování náklonů a hladiny podzemní vody v lokalitě Jezeří. Čtvrtletní zpráva o plnění Smlouvy o dílo č. LUAS-VŘ/15/2009/OPOM/A, Praha, 26 s.
- KALVODA J., STEMBERK J., VILÍMEK V., ZEMAN A. (1990): Analysis of levelling measurements of the Earth's surface movements on the geodynamic polygon Mikulovice–Jezeří in the Krušné hory Mts. Proc. 6th Int. IAEG Congres, č. 3, Amsterdam, s. 1631–1637.
- KALVODA, J., VILÍMEK, V., ZEMAN, A. (1994): Earth's surface movements in the hazardous area of Jezeří castle – Krušné hory mountains. Geojournal, 32, č. 3, s. 247–252.
- KOPECKÝ, L., KVĚT, R., MAREK, J. (1985): K otázce existence krušnohorského zlomu. Ústřední ústav geologický, č. 6, s. 164–168.
- KRÁL, V. (1968): Geomorfologie vrcholové části krušných hor a problém paroviny. Rozpravy Československé akademie věd, 78, č. 9, s. 42–49.
- MALCOVSKÝ, M. a kol. (1985): Geologie Severočeské hnědouhelné pánve a jejího okolí. Academia, Praha, 424 s.
- MALCOVSKÝ, M. (1977): Důležité zlomy platformního pokryvu severní části Českého masívu. Ústřední ústav geologický, č. 14, s. 7–12.
- MAREK, J. (1983): Problematika Jezeří v Krušných horách po provedeném inženýrsko-geologickém průzkumu. Památ. a přítomnost, 8, č. 4, s. 228–237.
- PICHLER, E. (1998): Svahové sesuvy na lomech. In: Valášek, V. a kol.: 45 let Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí v Mostě, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a. s., Most, s. 54–64.
- PICHLER, E. (2008): Průběžné sledování a vyhodnocování monitoringu bočních svahů lomu ČSA a technický dozor lomu ČSA – 4. etapa prací. Odborný posudek, VÚHU a. s., Most, 43 s.
- RYBÁŘ, J., KOŠTÁK, B., KALVODA, J., ŠPŮREK, M., DUDEK, J., (1975): Závěrná zpráva o výzkumu zákonitostí vzniku a vývoje svahových pohybů v letech 1971–1975. MS Geofond, GFP024994, Praha, 116 s.
- RYBÁŘ, J., NOVOTNÝ, J. (2005): Vliv klimatogenních faktorů na stabilitu přirozených a antropogenních svahů. Zpravodaj Hnědé uhlí, 3, Most, s. 13–28.
- RYBÁŘ, J. (2006): Vliv klimatu na vývoj různých typů svahových pohybů. Zprávy geologického výzkumu, s. 90–92.
- ŠPŮREK, M. (1974): Sesuvné jevy u Dřínova na Mostecku. Věstník Ústředního ústavu geologického, 49, s. 231–234.
- STANISLAV, P., BLÍN, J. (2007): Technické zabezpečení provozu automatické totální stanice Leica TCR 2003A v provozních podmínkách společnosti Mostecká uhelná a. s. Acta Montanistica Slovaca, 12, č. 3, s. 554–558.
- STOLÍNOVÁ, E., VILÍMEK V. (2003): Geomorfologická interpretace geodetických měření v Krušných horách. Geomorfologický sborník, 2, s. 247–252.



- ŠKVOR, V. (1975): Geologie české části Krušných hor a Smrčín. Academia, Praha, 119 s.
- VALEŠ, J. (1998): Řešení stabilitních problémů na jižním úpatí Krušných hor. In: Valášek, V. a kol.: 45 let Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí v Mostě, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a. s., Most, s. 95–100.
- VÁNĚ, M. (1960): Sutě a sesuvy na úpatí Krušných hor. Mineralogie a geologie, 5, č. 2, s. 174–177.
- VILÍMEK, V. (1992): Morfostrukturní vývoj reliéfu kateřinohorské klenby v Krušných horách. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 235 s.
- VILÍMEK, V. (1994): Přehled geomorfologických výzkumů střední části Krušných hor. Geografie, 99, č. 1, s. 29–38.
- VILÍMEK, V. (1995): Quaternary development of Kateřinohorská Vault relief in the Krušné hory Mountains. Acta Universitatis Carolinae, Geographica, 30, Supplementum, s. 115–137.
- VILÍMEK, V. (1998): Morfostrukturní vývoj reliéfu Kateřinohorské klenby v Krušných horách. Acta Montana, Series AB, 108, č. 5, 127 s.
- ZMÍTKO, J. (1983): Fosilní sesuvy při podkrušnohorském výchozu pánve. Hnědé uhlí, 6, s. 12–24.

## S u m m a r y

### THE INFLUENCE OF CLIMATE EFFECTS AND FLUCTUATIONS IN GROUNDWATER LEVEL ON THE STABILITY OF ANTHROPOGENIC FOOTHILL SLOPES IN THE KRUŠNÉ HORY MOUNTAINS, CZECHIA

The aim of this study is to describe the influence of climatic factors on the stability of the protective pillar, which is defined by state mining limits from the year 1992 and which was intended to prevent any relaxation of the tectonically broken crystalline slope around the Jezeří Castle (Marek 1983). The uniqueness of this part of the Krušné Hory Mountains is its extensive anthropogenic relief, especially the 300 m high anthropogenic slopes of the Československá armáda (ČSA) open-pit mine, which are directly linked to the steep slopes of the Krušné Hory Mountains. The stabilizing pillar, which is an area of interest, is covered by Quaternary proluvial and deluvial debris. A number of studies have demonstrated the susceptibility of Quaternary sediments to the development of mass movements (Burda 2008), and, in exceptional cases, deep-seated mass movements across the basin sediments (Rybář et al. 2005).

During the 1970s and 1980s, the Československá armáda open-pit mine advanced towards the foreground of the base of the Krušné Hory Mountains. In the 1980s, as part of mining expansion and unloading of the basin, leveling circuits  $Z_2b\ 11$  and  $Z_2b\ 3$  (later also  $Z_2b\ 12$ ) were found as verification of the hypothesis of the Krušné Hory Mountains uplift. The substrate for this study consists of geodetic monitoring of the side slopes of the ČSA open-pit mine, which was implemented beginning on 21 June 2005. 3D shifts of 45 geodetic points anchored in the pillar are monitored at one-hour intervals. The standard error of measurement (about 20 mm) makes it impossible to describe and interpret 3D shifts in millimeters. In order to eliminate measurement error, 10 points were selected for elimination where the value of the absolute 3D displacement from the beginning of the measurement exceeded 300 mm.

For precipitation analysis, data series from the Jezeří meteorological station, which is located at the base of the mountains in a forested area, were used. A five-year data series in one-hour intervals was available for analysis. The Jezeří meteorological station is situated directly in the area of interest allowing the records to be effectively used in the analysis of moderate to torrential rainfall. In addition to records from the Jezeří meteorological station, we compared the displacements of geodetic points to data from CHMI climatological stations Kopisty u Mostu (240 m a.s.l.) and Boleboř (640 m a.s.l.), for which data have been available since 1970. We also compared 3D shifts to a five-year data series of groundwater levels in borehole JZ 212, which is situated at the base of the mountains and so reflects water table fluctuations in Quaternary sediments.

This study demonstrates that it is not possible to accurately determine a dominant trigger, which leads to the genesis of landslides; it is always necessary to reflect on the combined

effects of several factors. In the study area, the existence of deep-seated landslides, shallow landslides and even earth flows were verified. The non-reclaimed SW-facing slope is modeled by shallow landslides and earthflows. This slope is sensitive to torrential rainfall and increased groundwater levels, which prevent deeper soaking-in and leads to the rapid saturation of surface horizons. Development of deep-seated landslides occurring on the SE-facing slope. In assessing the climatic factors affecting landslide genesis, we evaluate two or three-year term anomalies in long-term precipitation balance. Anomalies in the long-term precipitation balance cause the genesis of deep-seated landslides with a one or two-year delay.

- Fig. 1 – Stabilizing pillar under tectonically broken crystalline slope near Jezeří Chateau. Visible landslides on a non-reclaimed SW-facing slope of the stabilizing pillar, with the ČSA open-pit mine underlying. Photo J. Burda (2010).
- Fig. 2 – Triggering zone in SW slope, where a flow-like landslide occurred. Photo J. Burda (2010).
- Fig. 3 – General topographic and geological overview. Paleozoic: orthogneisses (muscovite, biotite), granites (muscovite, biotite), granite porphyry. Cenozoic: fluvial deposits, deluviofluvial deposits, deluvial sediments, base dumps (anthropogenic), proluvial deposits, Tertiary sands and sandy-clays, organic deposits; faults, supposed faults.
- Fig. 4 – The principle of the geodetic monitoring of the open-pit mine slopes, location of stations and configuration of monitored and reference points, which are equipped with reflective prisms (Brown et al. 2007).
- Fig. 5 – Sketch map showing the coordinates of 10 selected geodetic points in the stabilizing pillar slopes under the Jezeří Chateau. In the legend: Chateau arboretum, Jezeří Chateau, the edge of the ČSA mine, border of the stabilizing pillar for the Jezeří historic site, monitored geodetic points, hydro-geologic borehole, Jezeří weather station.
- Fig. 6 – Deviation from long-term rainfall average adjusted by the 36-month moving average, brand symbolizes deep-seated landslide in the study area.
- Fig. 7 – Comparison of monthly 3D displacements of selected geodetic points on the SE and SW slopes of the stabilizing pillar with rainfall cumulative deviation from the Jezeří weather station. Missing data were acquired from data sets from the Boleboř station. The x axis in the upper graph – monthly 3D movement (mm), in the lower graph – deviation from mean (mm).
- Fig. 8 – Daily precipitation (y axis, in mm) at the Jezeří weather station. Data set is incomplete in the periods of November 2007–February 2008 and June 2008–December 2008.
- Fig. 9 – Hourly temperature change (y axis, in °C) at the Jezeří weather station.
- Fig. 10 – Water table fluctuation in borehole JZ 212 E (y axis, in cm), from 24 March 2005 to 9 October 2009.

*Pracoviště autorů: J. Burda: Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a. s., Budovatelů 2830, 434 37 Most, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie; e-mail: burda@vuhu.cz. V. Vilímek: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43, Praha 2; e-mail: vilimek@natur.cuni.cz.*

*Do redakce došlo 24. 3. 2010; do tisku bylo přijato 4. 10. 2010.*

#### **Citační vzor:**

BURDA, J., VILÍMEK, V. (2010): Vliv klimatických faktorů a kolísání hladiny podzemní vody na stabilitu antropogenních svahů Krušných hor. *Geografie*, 115, č. 4, s. 377–392.