

Aktuálne trendy v monitorovaní svahových pohybov

PETER WAGNER¹, PETER ONDREJKA¹, LUBICA IGLÁROVÁ¹ a MAREK FRAŠTIA²

¹Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava;
peter.wagner@geology.sk

²Stavebná fakulta STU, Katedra geodézie, Radlinského 32, 813 68 Bratislava;
marek.frastia@stuba.sk

Current trends in the monitoring of slope movements

In the first part of the paper the knowledge about the current state of the slope movements monitoring in Slovakia, the used methods of observation and some achieved results are summarized. Except the events, when the monitoring was carried out during and after the engineering geological investigation, the authors pay the most attention to the process of solution and to partial results of the currently elaborated project entitled "Partial monitoring system of geological factors", subsystem "Landslides and other slope deformations". The second core part of the paper is devoted to a summary of the authors ideas on the future direction of the slope movements monitoring. It includes a list of reliable but also prospective methods of primary data obtaining, as well as the outline of the problems related to the transition to a higher level of monitoring – i. e. the creation and installation of the landslide early warning systems on the basis of current inland and foreign knowledge.

Key words: slope movements, methods of monitoring, early warning systems

Úvod

Svahové pohyby popri zemetraseniach, vulkanických erupciách a povodniach patria celosvetovo k najobávanejším geodynamickým javom. Výrazne negatívne ovplyvňujú vývoj ľudskej spoločnosti a nezriedka priamo ohrozujú životné prostredie človeka, jeho majetok a v extrémnych prípadoch i život. Vzhľadom na hornatý reliéf a veľmi pestrú geologickú stavbu územia nášho štátu je potenciálna nestabilita niektorých jeho oblastí stále aktuálnym problémom. Práve preto prejavy svahových pohybov s nepriaznivými dôsledkami na životné prostredie každoročne narastajú. Po viacerých negatívnych skúsenostiach so svahovými pohybmi (ktorých nepriaznivý dosah sa do povedomia verejnosti dostal hlavne po katastrofálnom handlovskom zosuve z roku 1960, patriacom medzi najrozsiahlejšie prírodné katastrofy na našom území vôbec – Záruba a Mencl, 1987; Nemčok, 1982) si odborníci, štátne orgány i široká verejnosť uvedomili, že i v prostredí Západných Karpát môže dôjsť k rozsiahlym gravitačným pohybom s ničivými dôsledkami. Spôsobí ich môžu či už extrémne klimatické podmienky, alebo nevhodné zásahy človeka do horninového prostredia. Bohaté skúsenosti zo zahraničnej i domácej praxe však poukazujú na to, že stabilizácia vzniknutých alebo aktivovaných svahových pohybov, ako aj odstránenie ich dôsledkov je technicky i ekonomicky podstatne náročnejšie, než prevencia, ktorá vychádza z poznania aktuálneho stabilného stavu svahov a zo znalosti príčin jeho zmien. Zjednodušene povedané, je potrebné naučiť sa so svahovými pohybmi žiť, poznať

dôsledky prirodzených vplyvov i umelých zásahov na aktuálny stabilný stav svahov a citlivo tieto vplyvy i zásahy usmerňovať. Aplikovať takýto prístup možno však iba na základe informácií, ktoré sa získajú z monitorovania rôznych prejavov svahových pohybov alebo stavu činiteľov najviac ovplyvňujúcich stabilný stav svahov.

V prvej časti príspevku sa sumarizujú poznatky o súčasnom stave monitorovania svahových pohybov na Slovensku, o používaných metódach a o niektorých dosiahnutých výsledkoch. Druhá, ťažisková časť článku, sa zameriava na zhrnutie predstáv o ďalšom smerovaní monitorovania svahových pohybov. Pozornosť sa venuje získavaniu prvotných údajov aj spôsobom spracovania a praktického využitia výsledkov, pričom sa zohľadňujú aktuálne domáce i zahraničné poznatky.

Súčasný stav monitorovania svahových pohybov na Slovensku

Pozícia monitorovania v procese prípravy a prevádzky technických diel

Monitorovanie svahových pohybov bolo súčasťou inžinierskogeologických prác na nestabilných územiach už v minulosti; zvyčajne sa uplatňovalo počas sanačných opatrení a po ich skončení kvôli overeniu ich efektívnosti a funkčnosti. Takýto monitoring, tvoriaci súčasť inžinierskogeologického prieskumu, však predstavoval iba krátkodobý proces, ktorý bol po opustení lokality prieskumnou organizáciou skončený (maximálne cca po

jednom roku), s čím zvyčajne súviselo nielen skončenie pravidelných meraní na vybudovaných monitorovacích objektoch, ale aj skončenie starostlivosti o sanačné objekty. Je pochopiteľné, že organizácie, ktoré vykonali prieskum a vybudovali sanačné opatrenia, nemali možnosť dlhodobo zabezpečovať ich bezporuchovú prevádzku a orgány miestnej samosprávy vo väčšine prípadov možnosť reaktivácie svahových pohybov podcenili a na monitorovanie funkčnosti a údržbu sanačných objektov prostriedky nevyčlenili. Pritom však napríklad poznatok o starnutí subhorizontálnych odvodňovacích vrtov a nevyhnutnosti ich pravidelného prečistovania (aspoň v desaťročných intervaloch) je všeobecne známy. Obnovenie záujmu o funkčnosť sanačných objektov zvyčajne súviselo s obnovením prejavov aktivácie svahových pohybov a potrebné opatrenia boli spravidla náročné z technického i ekonomického hľadiska. Uvedeným spôsobom sa postupovalo pri prieskume väčšiny významných svahových pohybov na Slovensku v druhej polovici minulého storočia a nezriedka bol zaznamenaný opakovaný záujem o zosuvnú lokalitu, sanovanú v minulosti (stačí uviesť opakovanú sanáciu katastrálneho handlovského zosuvu – Beracko, 1980 alebo opakovaný prieskum a sanáciu zosuvného územia v intraviláne obce Veľká Čausa – Lehocký et al., 1969; Otepka et al., 1976; Mesko et al., 1985; Jadroň a Mokrá, 1999).

Výnimku zo zaužívej praxe predstavovali náročné stavebné diela situované v potenciálne nestabilnom prostredí. Ich výstavba nestabilitu svahov nielen iniciuje, ale súčasne je ich bezporuchová prevádzka potenciálnou nestabilitou trvalo ohrozená. Ide predovšetkým o významné vodné stavby, na ktorých sa okrem nevyhnutného monitorovania správnej prevádzky diela v prípade ohrozenia priehradou alebo zátopovej oblasti svahovými pohybmi zriaďovali monitorovacie siete. Tie sa pravidelne pozorovali a závery z monitorovania stability svahov tvorili súčasť komplexného hodnotenia bezpečnosti diela. Z tohto hľadiska je dostatočne ilustratívny príklad vodného diela Liptovská Mara. Monitorovanie tzv. Veľkomarského zosuvu, ktorý sa nachádza neďaleko pravostranného zaviazania priehradu, sa vykonáva nepretržite od realizácie diela, teda cca 35 rokov (Kopecký a Magula, 2005).

Najčastejšie sa problémy so stabilitou svahov prejavujú pri výstavbe a prevádzke líniových stavieb (predovšetkým ciest a železníc, ktorých trasa prechádza veľmi rôznorodým geologickým prostredím a často sa nemôže vyhnúť ani nestabilným územiám). Postupne, po mnohých nepriaznivých až varovných skúsenostiach, sa preto v zložkách ich prípravy začal presadzovať trend, aby vybudovanie monitorovacej siete bolo súčasťou každého úseku, ktorý je potenciálne ohrozený svahovými pohybmi a aby sa takto definovaný úsek monitoroval dlhodobo – nielen počas inžinierskogeologického prieskumu, ale i počas výstavby a prevádzky stavebného diela. Ilustráciu spomínaného prístupu je vydanie technických predpisov o monitorovaní vplyvu cestných komunikácií na životné prostredie, súčasťou ktorých sú aj zásady monitorovania geologického prostredia. Prvý takýto technický predpis vydala Slovenská správa ciest v roku 1998 a jeho

aktualizovaná verzia z roku 2008 je zverejnená na webovej stránke organizácie (www.ssc.sk – Technické predpisy – rok 2008 – TP 06/2008 Príručka monitoringu vplyvu cestných komunikácií na životné prostredie). Pri výbere potenciálne nestabilných úsekov, ale i stavenísk vo všeobecnosti sa vychádza zo známej skutočnosti, že svahové pohyby sa vo veľkej väčšine prípadov aktivujú na miestach, kde sa už v geologickej minulosti vyskytovali (Malgot a Baliak, 1996). Vhodnou pomôckou pre geológov i projektantov sú z tohto hľadiska mapy stability svahov, ktoré boli pre celé Slovensko spracované v mierke 1 : 50 000 (Šimeková, Martinčeková (red.) et al., 2007). Pre odhad stupňa ohrozenia územia technickým dielom stačí informáciu o jeho náchylnosti na vznik, resp. aktiváciu svahového pohybu, prevzatú z príslušnej mapy, doplniť situovaním a projektovanými parametrami technického diela (napr. v prípade líniových stavieb ide predovšetkým o úseky hlbokých zárezov v potenciálne nestabilnom prostredí).

Okrem spomínaných, účelovo zameraných monitorovacích aktivít, sa celoplošné monitorovanie zosuvov a iných svahových deformácií vykonáva na vybraných lokalitách z celého Slovenska v rámci riešenia úlohy „Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia SR“, ktorej objednávateľom je Ministerstvo životného prostredia SR a zhotoviteľom ŠGÚDŠ v Bratislave.

Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov

Riešenie spomínanej úlohy dotvára komplexnú predstavu o aktuálnom stave a vývoji životného prostredia na Slovensku a poskytuje bohatú informáciu o jednej z dôležitých zložiek prírodného prostredia – geologických faktoroch. Práve zosuvy a iné svahové deformácie tvoria jeden z najdôležitejších pozorovaných a hodnotených javov (Klukanová, 2002).

Realizácia sa začala v roku 1993 a v rámci podsystemu „Zosuvy a iné svahové deformácie“ sa monitoruje viacero reprezentatívnych lokalít rôznych typov svahových pohybov. Súbor monitorovaných oblastí však nie je nemenný a upravuje sa podľa celospoločenských potrieb. Významné novovzniknuté územia svahových pohybov sa do súboru dopĺňujú a na menej dôležitých sa frekvencia monitorovacích meraní znižuje, prípadne sa zo súboru vyradujú. V roku 2008 bolo pozorovaných a zhodnotených 31 lokalít na území Slovenska (najviac z oblasti Handlovskej kotliny).

Metódy monitorovania používané v rámci danej úlohy, ale i v bežnej praxi inžinierskogeologického prieskumu vychádzajú z dlhodobých tradícií a sú odlišné pre rôzne typy svahových pohybov. V súčasnosti najčastejšie aplikované metódy sú zhrnuté v tab. 1 a opísané vo viacerých predchádzajúcich publikáciách (Wagner et al., 2000; Wagner et al., 2002). Z uvedeného dôvodu sa v tomto príspevku ich podrobnejší opis nenachádza – iba v nasledujúcej kapitole sa stručne hodnotí perspektívnosť používania každej z nich.

Z dĺžky pozorovaného obdobia (vo väčšine prípadov presahujúcej 10 rokov) vyplýva nahromadenie bohatých

súborov údajov o zmenách jednotlivých parametrov. Získané časové rady ich zmien boli doteraz najčastejšou formou prezentácie výsledkov monitorovania a poskytovali názornú ilustráciu o vývoji a vzájomnom vzťahu zmien jednotlivých parametrov, ako aj orientačné údaje o jeho stave vo vzťahu k stabilnému stavu pozorovanej lokality (obr. 1). Dostatočná hustota monitorovacej siete a vyhovujúca frekvencia zberu údajov umožňovali i ďalšie, názornejšie spôsoby vyjadrovania výsledkov monitorovania, napríklad formou komplexného hodnotenia aktivity svahového pohybu v príslušnom časovom období na príslušnej lokalite (Wagner a Paudiš, 2002). V podstate však možno konštatovať, že doterajšia rozsiahla databáza údajov predstavuje podklad pre prechod na vyšší stupeň hodnotenia stabilného stavu pozorovaných území. Je ním zdôvodnené umiestnenie a objektívne nastavenie systémov včasného varovania, ako aj prognózovanie vývoja stabilného stavu pri rôznych hodnotách okrajových podmienok vplývajúcich faktorov. Niektoré aspekty uvedenej problematiky sú aspoň orientačne načrtnuté v nasledujúcej časti článku.

Napriek tomu, že doterajšie obdobie monitorovania predstavovalo v prvom rade etapu zberu, systematického ukladania, rôznych, často empirických spôsobov spraco-

vania a prezentácie veľmi rôznorodých súborov údajov, dosiahlo sa už v tomto období viacero celospoločensky cenných výsledkov. Okrem priebežných informácií a upozornení pre orgány miestnej samosprávy, resp. vlastníkov ohrozených objektov na pozorovaných lokalitách, ktoré sú zhrnuté i v každoročných správach prístupných na internete (www.geology.sk – Stredisko ČMS GF – Publikácie a správy), prispeli výsledky monitorovania k praktickému riešeniu nasledujúcich nepriaznivých stavov:

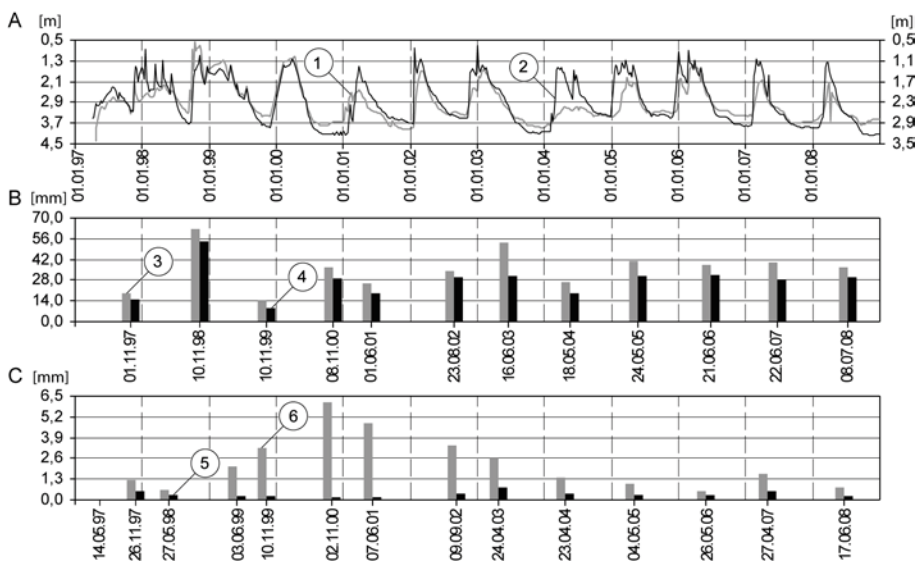
– v lokalite Fintice po dvoch poruchách vysokotlakového plynovodu (v rokoch 1986 a 1998), spôsobených aktívnym svahovým pohybom, bola trasa plynovodu na základe prieskumu a zhodnotenia výsledkov monitorovania preložená mimo aktívny zosuv (Petro et al., 2001);

– na zosuve pri Bojniciach (Ondrejka a Wagner, 2008) bola vykonaná kompletná oprava a utesnenie splaškovej kanalizácie s cieľom zamedziť prieniku odpadových vôd do zosuvných hmôt, ktorých lokálnu aktiváciu preukázali výsledky monitorovania;

– na území Okoličné v intraviláne Liptovského Mikuláša (Ondrejka, 2009) prispeli výsledky dlhodobého monitorovania k rozhodnutiu o preložení trasy železnice mimo územie trvalo ohrozené periodickými aktivitami zosuvných hmôt;

Tab. 1
Prehľad aktuálnych a perspektívnych metód monitorovania svahových pohybov
Review of current and prospective methods of slope movements monitoring

Typ svahového pohybu	Merané charakteristiky	Metódy monitorovania	
		Merania vykonávané v súčasnosti	Perspektívne metódy
zosúvanie	a) posun	– geodetické – terestrické – geodetické – družicové (GNSS)	– geodetické – laserové skenovania (LiDAR) – diaľkový prieskum (SAR/InSAR) – terestrická aplikácia metódy – GB-InSAR
	b) deformácia	– presná inklinometria	– kontinuálna inklinometria – priestorové merania systémom Trivec – časová reflektometria (TDR)
	c) napätostný stav	– povrchové reziduálne napätie – pole pulzných elektromagnetických emisií (PEE)	– mikroseizmické
	d) zosuvotvorné faktory (režimové pozorovania)	– hĺbka hladiny podzemnej vody a jej teplota (vykonávané pozorovateľmi, resp. automatickými hladinomeri) – výdatnosť odvodňovacích zariadení (spojené s určením vodivosti a odberom vzoriek vody) – zrážkové úhrny	– merania pórových tlakov – merania vodnej hodnoty snehovej pokrývky – merania pôdnej vlhkosti
rútenie	a) posun	– dilatometrické (tyčovým meradlom Somet a meradlom posunov) – fotogrametrické (metóda stereofotogrametrie, metóda časovej základnice a konvergentná fotogrametria)	– merania automatickým dilatometrom – fotogrametrické skenovanie – terestrické laserové skenovanie
	b) napätostný stav		– mikroseizmické
	c) zosuvotvorné faktory d) zmeny morfológie skalnej steny	– počet mrazových dní – mikromorfologické zmeny povrchu horniny	
plazenie	a) posun	– dilatometrické (optickomechanickým dilatometrom TM-71)	



Obr. 1. Časový vývoj monitorovacích pozorovaní na zosuvnej lokalite v Bojniciach (upravené podľa Ondrejka a Wagner, 2008). A – priebeh hladiny podzemnej vody; B – priemerná zmena na piatich pozorovacích bodoch geodetickej siete; C – deformácie inklínometrickej pažnice vo vrte JB-1; 1 – vrt B-3; 2 – vrt B-4; 3 – maximálna; 4 – priemerná hodnota z danej etapy merania; 5 – deformácia v hĺbke 5,0 m; 6 – deformácia v hĺbke 2,5 m.

Fig. 1. Time series of monitoring observations at the landslide site in Bojniciach (adjusted according to Ondrejka and Wagner, 2008). A – the course of groundwater level; B – average change at five observed points of geodetic network; C – deformation of the inclinometric casing in the borehole JB-1; 1 – borehole B-3; 2 – borehole B-4; 3 – maximum; 4 – average value of the measuring campaign; 5 – deformation at a depth of 5.0 m; 6 – deformation at a depth of 2.5 m.

– v oblasti Demjata (Iglárová et al., 2005) bol na základe preukázaných lokálnych prejavov nestability skalných blokov svah upravený a stabilizovaný;

– vzhľadom na potenciálnu nestabilitu skalného bloku, ohrozujúceho turistický chodník v Slovenskom raji (v doline Suchá Belá), bol na základe opakovaného fotogrametrického zhodnotenia (Fraštia, 2007) chodník preložený mimo dosah tohto bloku do svahu (obr. 2).

Iba niekoľko vybraných príkladov ilustruje odôvodnenosť dlhodobého monitorovania svahových pohybov a existencie bohatej databázy údajov podmieňuje nutnosť postupného prechodu na exaktnejšiu formu varovných systémov s priebežným spresňovaním na základe pokračujúcich monitorovacích meraní.

Perspektívy v monitorovaní svahových pohybov

Úmerne s rozvojom techniky meraní, ale i nárastom požiadaviek na komplexnosť a presnosť hodnotenia stabilného stavu zosuvných území zvyšujú sa i nároky na kvantitu, ale i kvalitu primárnych údajov získaných monitorovacími meraniami, ako aj na spôsoby ich spracovania, prezentácie a praktického využívania. V nasledujúcom texte sú načrtnuté optimálne smery ďalšieho vývoja monitorovania svahových pohybov, spracované na báze získaných skúseností, ako aj súčasného stavu domácich i zahraničných poznatkov v tejto oblasti.

Aktuálne metódy zberu vstupných údajov

Existujúce i perspektívne metódy zberu primárnych údajov z monitorovania svahových pohybov sú zhrnuté v tab. 1. Vzhľadom na rozdielnu podstatu meraní sa v tabuľke samostatne vyčleňujú metódy používané pre rôzne typy svahových pohybov.



Obr. 2. Premiestnenie turistického chodníka na protiláhly svah v dôsledku trvalého ohrozenia pôvodnej trasy potenciálne nestabilným skalným blokom – dolina Suchá Belá v Slovenskom raji (foto I. Mašlárová). 1 – nestabilný skalný blok; 2 – pôvodná trasa chodníka; 3 – preložená trasa.

Fig. 2. Relocation of the tourist trail to the opposite slope as a result of continued threats of the original route by potentially unstable rock block – the Suchá Belá valley in the Slovenský raj area (photo I. Mašlárová). 1 – unstable rock block; 2 – original route of the tourist trail; 3 – relocated route.

Najväčší súbor monitorovacích metód sa aplikuje pri meraní rôznych prejavov svahových pohybov typu zosúvania.

Zosúvanie

a) Merania posunov.

Azda základným monitorovacím meraním na zosuvných územiach je meranie pohybu zosuvných hmôt vykonávané prostredníctvom merania posunov bodov monitorovacej siete v určitých časových intervaloch. Na meranie posunov bodov sa používa viacero metód (tab. 1); najpoužívanejšie z nich sú charakterizované v nasledujúcom stručnom prehľade.

Najčastejšie sa aplikujú rôzne *terestrické geodetické metódy*, ktoré majú v tejto oblasti použitia najbohatšiu tradíciu. Podstata terestrických metód zostáva v zásade rovnaká, avšak vďaka výraznému progresu v kvalite meracej techniky i v spôsoboch spracovávania údajov sa postupne dosahuje čoraz väčšia presnosť meraní. Možno konštatovať, že napr. klasickou geodetickou technológiou založenou na priestorovej polárnej metóde možno dosiahnuť priestorovú bodovú presnosť až 1 mm, terestrickým laserovým skenovaním (TLS) cca 3 – 5 mm. Presnosť fotogrametrických metód závisí predovšetkým od vzdialenosti stanovísk snímokovania od pozorovaného objektu, preto možno pri krátkych vzdialenostiach (< 5 m) dosahovať submilimetrové presnosti, pri väčších vzdialenostiach (20 – 30 m) subcentimetrovú presnosť. Samozrejme, každá zo spomenutých technológií má svoje špecifiká a netreba zabúdať ani na obmedzenia dané podmienkami v pozorovanej lokalite, prípadne obmedzenia dané požadovanými výstupmi (Fraštia, 2009).

Terestrické metódy v určitých typoch lokalít sa v poslednom desaťročí v značnej miere nahrádzajú *presnou družicovou technológiou GNSS (Globálne navigačné satelitné systémy)*, ktorá sa významne využíva v geodézii na veľmi presné meranie priestorovej polohy diskretných bodov. GNSS technológia sa však neradí medzi technológie diaľkového prieskumu, pretože nemá potenciál zberu vysoko hustých údajov z veľkých území v krátkom časovom intervale. Napriek nesporným výhodám a búrlivému vývoju meracej technológie GNSS z hľadiska metodického i inštrumentálneho, nemôže na zosuvných územiach zatiaľ úplne nahradiť klasické terestrické metódy vzhľadom na to, že v prípade zalesnených častí územia nie je metóda GNSS aplikovateľná. Preto i pre budúcnosť možno za perspektívnu považovať vzájomnú kombináciu terestrických i GNSS metód v závislosti od charakteru meranej lokality.

V posledných rokoch sa v rámci metód, aplikovaných pri monitorovaní zosuvov, prejavil výrazný nástup *geodetickej technológie laserového skenovania*, ako aj technológií *diaľkového prieskumu*. Vo väčšine prípadov ide o metódy využiteľné predovšetkým pri výskume regionálneho charakteru, dokonca možno konštatovať, že v súčasnosti sotva môže byť takýto projekt úspešný bez aplikácie daných metód. Stále zdokonaľovanie uvedených

technik však umožňuje v určitom rozsahu ich použitie i pri lokálnom výskume zosuvov (technológie pôvodne aplikované v diaľkovom prieskume sa začali používať aj v terestrickom, teda blízkom prieskume). K najpoužívanejším z tejto skupiny meracích technik patria:

– *LiDAR (Light Detection And Ranging)* – ide o technológiu leteckého laserového skenovania. Ako platforma sa využívajú lietadlá vybavené okrem samotného lasera aj zariadeniami na určenie jeho polohy (GNSS) a orientácie (IMU – inerciálny merací systém). Dosah LiDAR prístrojov sa pohybuje od 1 000 do 2 000 m pri presnosti meranej dĺžky 1 cm. Výšková presnosť generovaného digitálneho modelu reliéfu (DMR) závisí predovšetkým od hustoty meraných bodov. Nevýhodou je nefunkčnosť zariadenia v prípade hmly, dažďa a snehu, keďže voda značne absorbuje svetelné vlnenie vlnových dĺžok používaných týmito laserovými prístrojmi.

– *SAR (Synthetic Aperture Radar)* – na rozdiel od laserového skenera (orientovaného na svetelné vlny dĺžky cca 1 μ m) využíva radarové vlnové dĺžky (mikrovlny) s hodnotou 5,6 cm vo viacerých frekvenčných pásmach. SAR je aktívny družicový systém, ktorý prijíma a spracováva vlnenie vyslané anténou. Je nezávislý od osvetlenia zemského povrchu (môže pracovať tak vo dne, ako aj v noci), je nezávislý od počasia (vlny bez problémov prechádzajú oblakmi), mikrovlny poskytujú informácie aj o geometrických a dielektrických vlastnostiach zemského povrchu (drsnosť, chemické zloženie, vlhkosť a pod.). Mikrovlny prechádzajú aj inými materiálmi, ako je napr. pôda a vegetácia, a preto sú schopné zachytiť aj zakryté objekty. Spolu s optickými záznamami poskytujú „neviditeľné“ informácie, pokiaľ sú skúmané samostatne. Snímky zhotovené z mierne odlišných stanovísk je možné využiť na tvorbu stereopárov pozorovateľných v 3D móde.

Použitím princípu *interferometrie*, teda stanovenia indexu lomu svetla s využitím jeho interferencie (*InSAR – Interferometric SAR*) dvoch snímok z rôznych časových etáp, možno pozorovať pohyby zemského povrchu s presnosťou rádovo cm. Presnosť možno zvýšiť o rád použitím vhodných odrážačov mikrovln. V súčasnosti sa začínajú používať pre potreby monitorovania deformácií priehrad, ale aj zosuvných svahov *pozemné radarové systémy (GB – InSAR, Ground Based InSAR)*, ktoré sú schopné určiť deformáciu v smere merania pri veľkosti 0,1 mm zo vzdialenosti až 4 000 m pri rozlíšení 0,5 x 4,5 m, čo predstavuje veľkosť pixela radarového záznamu na reálnej ploche v teréne (Albaa et al., 2008).

b) Merania deformácií.

Svojou podstatou sú merania deformácií veľmi príbuzné meraniam posunov; vykonávajú sa však v podpovrchových polohách zosuvných hmôt. V praxi sa aplikuje viacero spôsobov (tab. 1), najčastejšie používané z nich sú zhrnuté v nasledujúcom texte.

V prvom rade ide o *metódu presnej inklinometrie* (Gajdoš a Wagner, 2005), ktorá je v súčasnosti určite najoverenejšou, a preto i najpoužívanejšou metódou merania deformácií horninového prostredia v rôznych

hĺbkach. Vzhľadom na kvalitu výstupov (úplná informácia o vektore deformácie v príslušnej rovine merania) táto metóda prakticky „vytlačila“ iné spôsoby, aplikované na tento účel v minulosti (napr. priechodomery, kyvadlá) a je stále aktuálna a požadovaná. Súčasne možno konštatovať, že prevažná väčšina novších metód merania deformácií je odvodená práve zo základného typu merania presnou inklinometriou.

Z postupov, ktoré sa v súčasnosti začínajú overovať a možno ich považovať za perspektívne pri ďalšom vývoji a skvalitňovaní monitorovania deformácií, treba uviesť *metódu kontinuálnej inklinometrie*. Umožňuje merať vývoj deformácií zvyčajne na úrovni šmykovej plochy. Výsledky poskytujú veľmi cennú informáciu o momentálnej aktivite zosuvného pohybu. Merania kontinuálnym inklinometrom majú podstatne vyššiu frekvenciu, čo významne mení pohľad na vývoj deformácie v čase. Táto skutočnosť podporuje možnosť porovnávať výsledky s inými zisteniami, a tak odvodiť prípadné závislosti medzi nimi. Nevýhodou je technicky a teda aj ekonomicky veľmi náročné získavanie informácie z celého profilu vrtnu. Pozornosť sa preto venuje vybraným zónam – šmykovým plochám, ktoré treba určiť s vysokou presnosťou ešte pred inštaláciou zariadenia.

K ďalšiemu zdokonaleniu meraní presnou inklinometriou patrí určite aplikácia systému *Trivec* umožňujúceho v špeciálne vystrojených vrtoch merať deformácie v troch na seba navzájom kolmých smeroch (Willenberg et al., 2002).

Kvalitatívne určenie polôh vo vrte, v ktorých sa zaznamenali najväčšie hodnoty deformácií, umožňuje *metóda časovej reflektometrie (Time Domain Reflectometry – TDR)*. V princípe ide o zaznamenávanie elektrických impulzov odrazených od vytvorenej prekážky (napr. od ohybu vrtnej pažnice); metóda teda slúži na identifikáciu polohy šmykových plôch pri podstatne nižšej nákladovosti a menšej časovej náročnosti získavania údajov v porovnaní s klasickou inklinometriou. Metóda sa v súčasnosti overuje, resp. pripravuje na overenie vo viacerých zosuvných lokalitách (Drusa et al., 2009).

c) Merania napätostného stavu.

Ide o merania, ktoré majú oproti predchádzajúcim skupinám nespornú výhodu v tom, že indikujú zmeny napätostného stavu prostredia pred vlastným zosuvným pohybom – v prípade dlhšieho časového radu meraní možno odvodiť trendy vývoja napätostného stavu svahu a do určitej miery prognózovať ďalší vývoj jeho stability. Perspektívnosť používaných metód (tab. 1) je rozdielna, čo ilustruje i nasledujúca analýza.

Z doteraz používaných postupov sa postupne upúšťa od metódy merania *povrchových reziduálnych napätí* (Fussgänger a Jadroň, 1977), ktorá je technicky náročná a jej výsledky charakterizujú prevažne stav najvrchnejšieho, pripovrchového horizontu zosuvných hmôt.

Naopak, za veľmi perspektívnu možno považovať metódu merania *poľa pulzných elektromagnetických emisií* (PEE – Vybíral a Wagner, 2002), ktorá umožňuje identifikovať miesta koncentrácie napätí v rôznych hĺbkach

meraného vrtnu. Dlhoročné skúsenosti s aplikáciou tohto spôsobu preukázali jeho prognostický charakter (napríklad po opakovaných koncentráciách napätí v určitej hĺbke došlo na danom mieste k porušeniu vrtnu, ktoré bolo potom exaktne zaznamenané metódou presnej inklinometrie). Ďalší vývoj postupu je podmienený objektivizáciou a kvantifikáciou nameraných výsledkov.

Možno sa domnievať, že kvalitu monitorovania v budúcnosti zvýšia práve analogické prognostické merania, ktorých výsledky necharakterizujú iba zmeny prostredia v momente merania, ale naznačujú trendy vývoja stabilného stavu vrátane upozornení, kde možno v najbližšej budúcnosti očakávať aktiváciu pohybu. Ako veľmi perspektívne z tohto hľadiska sa javia rôzne geofyzikálne metódy, predovšetkým *mikroseizmické merania*, vychádzajúce zo skutočnosti, že pred zosuvnými, ale i rúťivými pohybmi dochádza ku generovaniu elastickej energie, čo sa prejavuje vibráciami v prostredí pred iniciovaním samotného pohybu. Prírodzene, úspešná praktická aplikácia tejto predstavy si vyžaduje odvodenie spoľahlivého vzťahu medzi hodnotami zaznamenaných vibrácií a aktivitou pohybu, nameranou tradičnými monitorovacími metódami (Ponziani et al., 2008). Možno predpokladať, že vytvorenie spoľahlivej monitorovacej siete, zaznamenávajúcej včasné príznaky aktivácie zosuvných alebo rúťivých pohybov patrí k najaktuálnejším úlohám monitorovania svahových pohybov v budúcnosti.

d) Merania zmien zosuvotvorných faktorov.

V našich podmienkach sa pozornosť tradične sústreďuje na režimové pozorovania zmien úrovne hladiny podzemnej vody v pozorovacích objektoch a zmien výdatnosti odvodňovacích zariadení (tab. 1).

Pri *meraní zmien hĺbky hladiny podzemnej vody* sa oproti minulosti vo všetkých významnejších lokalitách merania pozorovateľov nahrádzajú kontinuálnym zberom údajov pomocou automatických hladinomerov, ktoré, navyše, kontinuálne zaznamenávajú i zmeny teploty podzemnej vody, čo vytvára potenciál pre širšie analýzy medzi rôznymi pozorovanými faktormi.

Merania výdatnosti odvodňovacích zariadení, spojené s *meraniami vodivosti* a odberom vzoriek na analýzu *chemického zloženia vody*, či *izotopového zloženia H a O*, vo väčšine prípadov vykonávajú pozorovatelia. Vo vybraných lokalitách možno v budúcnosti tiež uvažovať nad inštaláciou kontinuálnych meracích zariadení – ich použitie v značnej miere závisí od možnosti technického umiestnenia prístrojov v každej konkrétnej lokalite.

Nevyhnutnou súčasťou informácií o stave zosuvotvorných faktorov sú *údaje o zrážkach*. Zvyčajne sa preberá z údajov siete staníc SHMÚ; v celospoločensky dôležitých lokalitách však možno inštalovať lokálne zrážkomerné stanice, zaznamenávajúce i údaje o teplote vzduchu. Poznatky o zrážkach patria (spoločne s náchylnosťou územia na svahové pohyby) k ťažiskovému údaju o pravdepodobnosti vzniku svahových pohybov, na ktorom sú založené viaceré systémy včasného varovania vo svete. Treba však podotknúť, že pri štúdiu lokálnych

svahových pohybov nie je závislosť medzi zrážkami a aktiváciou svahového pohybu až taká jednoduchá a jednoznačná.

V doterajšej monitorovacej praxi sa okrem spomenutého pomerne skromne uplatňuje pozorovanie ďalších, nesporne veľmi významných javov. Ide predovšetkým o nasledujúce typy meraní (tab. 1):

– *Meranie pórových tlakov vody*, ktorých poznanie je predpokladom zostavenia spoľahlivého stabilného výpočtového modelu (ide o údaj o napätosti – vztlaku podzemnej vody). Vzhľadom na to, že v poslednom období sa významne rozšíril súbor meracích metód i spoľahlivosť získaných výsledkov (Gróf, 2008), vzrastá nevyhnutnosť postupne zaradovať tento typ meraní do súboru monitorovacích metód.

– *Meranie vodnej hodnoty snehovej pokrývky* (množstvo vody, ktoré vznikne po roztopení snehu), vykonávané na konci zimného obdobia. Uvedený parameter charakterizuje zásoby vody, ktoré sa počas jarného topenia uvoľnia do horninového prostredia. Roztopenie niekoľkomesačných zrážok naakumulovaných v snehovej pokrývke v relatívne krátkom čase má veľký význam i na stav hladiny podzemnej vody a v nestabilných územiach môže priamo spôsobiť aktiváciu svahového pohybu. Na stanovenie vodnej hodnoty snehovej pokrývky sa používa buď priame meranie pomocou váhového snehomeru alebo výpočet na základe hustoty snehovej pokrývky (Holko et al., 2001).

– *Meranie pôdnej vlhkosti*, ktorá je dôležitým údajom, umožňujúcim odvodiť aktuálnu evapotranspiráciu v zosuvnom území. Často sa určuje ako časť potenciálnej evapotranspirácie, pričom vzájomný pomer týchto dvoch veličín sa pokladá za funkciu vlhkosti pôdy (Matejka a Hortalová, 2001).

Rútenie

Špecifický charakter majú metódy na monitorovanie náznakov svahových pohybov typu rútenia. V doterajšej praxi sa najčastejšie používali dva okruhy – metódy dilatometrické a fotogrametrické (tab. 1). Možno konštatovať, že obidva zostávajú stále aktuálne a dochádza iba k skvalitňovaniu postupu merania i vyhodnocovania výsledkov.

a) Merania posunov.

Z *dilatometrických meraní* sa najčastejšie aplikujú *merania tyčovým meradlom Somet*, ktorými sa zisťuje zmena vzdialenosti medzi bodmi, pevne osadenými v skalnej hornine. Jeho určitým zdokonalením je použitie *meradla posunov*, ktorým možno zaznamenať posun bodov nielen v rovine merania, ale v priestore (Wagner et al., 2002). Napriek širokému rozsahu použitia dilatometrických metód pri hodnotení stability skalných svahov treba upozorniť na zásadný technický problém ich aplikácie – pevné meracie body možno osadiť iba v relatívne pevnom skalnom prostredí. V dôsledku toho sú zvyčajne zmeny v najproblematickejších častiach skalného masívu (poruchové pásma, výrazné diskontinuity a pod.) nemerateľné.

Nesporným pokrokom a perspektívnym smerom v rozvoji je aplikácia *automatických dilatometrov*, kontinuálne zaznamenávajúcich zmeny vzdialenosti medzi meracími bodmi s diaľkovým prenosom údajov do centra monitorovania (Vařilová a Zvelebil, 2005; Vlčko et al., 2006). Aj v tomto prípade však treba okrem už spomínaných problémov s technickou inštaláciou reprezentatívnych meracích bodov upozorniť na skutočnosť, že napriek sústavnému záznamu deformácií dochádza v prostredí skalných hornín (predovšetkým krehkých) často k náhlým kolapsom bez predchádzajúceho „varovania“, teda vývoj posunov bodov nemusí byť plynulý, ale často má „skokovitý“ charakter.

Veľká výhoda *fotogrametrických meraní* vo všeobecnosti spočíva v optickom bezkontaktnom zaznamenávaní a vo fotografickom zachytení reality s vysokým rozlíšením. Takéto záznamy pokrývajú celú lokalitu a je možné sa k nim kedykoľvek vrátiť a domerať požadované parametre. Majú teda aj vysokú dokumentačnú a archívnu hodnotu. V súčasnosti sa spracovávajú výlučne v digitálnej forme (digitálna fotogrametria), čím sa výrazne zvýšila efektívnosť a presnosť prác. Dosiaľ sa na pozorovaných lokalitách aplikovali zväčša tieto fotogrametrické metódy:

– *Časová základnica*, predstavujúca dvojsnímkovú stereofotogrametrickú metódu, kedy sa ako ľavá snímka použije predošlá časová etapa a ako pravá snímka súčasná etapa. Zmena častí lokality v smere kolmom na os záberu (optickú os objektívu) sa prejaví ako horizontálna alebo vertikálna paralaxa. Výhodou metódy je jej jednoduchosť a presnosť, nevýhody spočívajú predovšetkým v zabezpečení rovnakej polohy a orientácie každej snímky v každej etape merania.

– *Stereofotogrametria*, ktorá je tiež dvojsnímkovou metódou, využívajúcou princíp prirodzeného stereoskopického videnia. Hlavnou výhodou je jej vysoká efektívnosť, keď sa na stereomodeli merajú priamo priestorové referenčné súradnice. Nevýhoda spočíva v nižšej presnosti v smere kolmom na snímkovaciu základnicu. Najčastejšie sa pri meraní skalných zárezov využíva bodový alebo čiarový – profilový zber údajov.

– *Konvergentné snímkovanie*, predstavujúce viacsnímkovú metódu, pričom snímky sa vyhotovujú tak, aby ich osi záberu boli konvergentné. Metóda je menej efektívna ako stereofotogrametria, avšak vyznačuje sa vyššou a homogénnou presnosťou vo všetkých osiach súradnicového systému. Na menších objektoch tak možno dosahovať presnosť priestorového určenia bodu vyššiu ako 1 mm (Fraštia, 2008).

Vďaka významnému rozvoju metodík, meracích techník, prístrojového zariadenia i metód spracovania údajov sa postupne v procese monitorovania stability skalných svahov overujú nové metódy, ktoré by sa mali rozvíjať i v budúcnosti. Z doteraz aplikovaných (tab. 1) treba spomenúť použitie *fotogrametrického skenera*, čo predstavuje softvérové riešenie pre tvorbu modelov povrchov s vysokým geometrickým rozlíšením (Fraštia, 2009). Metóda bola testovaná a ukázala sa vhodnou predovšetkým pre makroskopicky spojitú plochu, čo nie je prípad skalných zárezov, ktoré bývajú často veľmi

priestorovo členité. Výborné využitie by však metóda mohla mať pre modelovanie mikropovrchov malých rozmerov (< 1 m) a teda perspektívne by sa mohla využiť pri štúdiu zvetrávania skalných hornín.

Azda najperspektívnejšou zo skupiny geodetických metód, ktorá môže predchádzajúce doplniť a niektoré i nahradiť, je technológia *terestrického laserového skenovania*. Pulzné „time-of-flight“ skenery merajú čas letu svetelnej vlny od vyslania po prijatie a na základe známej rýchlosti šírenia vlnenia sa vypočíta meraná dĺžka. Pulzné skenery majú dosah merania až niekoľko 100 m s nepatrným poklesom presnosti v závislosti od narastajúcej vzdialenosti. Presnosť určenia priestorovej polohy bodu sa pritom pohybuje od 5 mm po 30 mm pri rýchlosti merania viac ako 50 000 bodov/sek. Presnosť modelovanej plochy sa pohybuje pri súčasných skeneroch od 2 mm. Výsledkom laserového skenovania je tzv. mračno bodov, teda množina diskretných priestorových bodov definovaných súradnicami XYZ. Je potrebné ich ďalej spracovať až do výsledného modelu meraného objektu, zvyčajne vyjadreného trojuholníkovou sieťou. Problémy, ktoré prináša táto technológia, spočívajú predovšetkým v možnom šume až strate údajov zapríčinenom nevhodnou odrazivosťou povrchu (čierne, lesklé a mokré povrchy), v šume zapríčinenom samotnou presnosťou meranej dĺžky, v meraní nesprávnych bodov (spôsobenom zákrytmi, hranami a vegetáciou) a v obrovskom množstve údajov (rádovo milióny bodov) so súvisiacimi problémami pri ich spracovaní. Nespornou výhodou a perspektívou tejto technológie je možnosť niektorých spracovateľských softvérov vytvárať rozdielové mapy takto meraných povrchov a určiť tak prípadné zmeny povrchu masívu (obr. 3 – Fraštia, 2009).

b) Merania napätostného stavu.

V doterajšej praxi sa daný typ meraní pri monitorovaní stability skalných stien prakticky neaplikoval. Domnievame sa však, že práve zaznamenanie zmien napätostného stavu skalného masívu je najlepšou indikáciou možného skalného rútenia v blízkej budúcnosti. Vzhľadom na vyššie spomenutú nevyspytateľnosť správania krehkých skalných hornín by optimálny spôsob monitorovania tohto prostredia mal v budúcnosti smerovať k aplikácii prognostických metód zaznamenávajúcich zmeny napätostného stavu skalných masívov včas, ešte pred prejavmi porušenia hornín. Z tohto hľadiska sa ako perspektívne javia už spomínané *mikroseizmické merania* vibrácií v horninovom prostredí.

c) Merania zmien zosuvotvorných faktorov.

Okrem tradičného zberu údajov o zrážkových úhrnoch zo staníc SHMÚ sú pri posudzovaní stability skalných svahov dôležité informácie o počte mrazových dní, ako aj vyčíslenie počtu náhlych extrémnych zmien teploty (prudké oteplenie, prudké ochladenie), významne vplyvujúcich na fyzický stav hodnoteného skalného masívu.

d) Merania zmien morfológie skalnej steny.

Možno ich považovať za doplnujúce, zamerané na zaznamenanie postupu zvetrávacích procesov na povrchu skalného masívu. Merania *mikromorfologických zmien* povrchu skalnej steny majú už pomerne bohatú tradíciu (Jánová a Liščák, 2001), preukázalo sa nimi viacero zaujímavých výsledkov a domnievame sa, že na daný účel



Obr. 3. Snímka časti skalného zárezu (vľavo) a modelovaná digitálna plocha (vpravo), Banská Štiavnica 2009 (foto M. Fraštia).

Fig. 3. Picture of the part of the rock open cut (left) and of modeled digital surface (right), Banská Štiavnica 2009 (photo M. Fraštia).

je vhodné v nich pokračovať podľa zaužívanej metodiky a s rovnakou frekvenciou (cca 2-krát ročne).

Plazenie

Pri monitorovaní svahových pohybov charakteru plazenia sa najčastejšie používa meranie *opticko-mechanickým dilatometrom TM-71* (Petro et al., 1999, 2004). Doterajšie výsledky meraní a ich vyhodnotenia naznačujú, že ide o vhodný a dostatočne reprezentatívny spôsob a možno ho odporučiť i v budúcnosti.

Praktické využitie výsledkov monitorovania

Vďaka veľkému množstvu osvedčených, ale i perspektívnych metód monitorovania sa postupne získava bohatý súbor údajov, charakterizujúcich okamžitý stav hodnoteného prostredia, ale umožňujúcich odvodzovať i vzájomné vzťahy medzi pozorovanými parametrami a prognózovať ich dlhodobý vývoj. Ako sme už naznačili v úvodných častiach článku, bohatý súbor informácií je v tomto štádiu monitorovania dostatočným základom na prechod od klasickej náplne monitorovania (teda od systematického zaznamenávania zmien pozorovaných parametrov v čase) k vyššej úrovni, ktorou je jednoznačne odvodenie a inštalácia systémov včasného varovania. Ide tým o splnenie základnej celospoločenskej požiadavky kladenej na monitorovanie geologických faktorov, a síce na včasné predchádzanie ich nepriaznivému vplyvu na rozvoj spoločnosti a kvalitu životného prostredia.

Tvorba systémov včasného varovania pred nepriaznivými vplyvmi geologických faktorov patrí v súčasnosti celosvetovo k veľmi aktuálnym otázkam, rozpracováva sa z rôznych aspektov a reprezentuje oblasť aktívneho a požadovaného vstupu poznatkov geologických vied do problematiky rozvoja ľudskej spoločnosti v širokej škále mierok.

Systémy včasného varovania pred svahovými pohybmi (EWS – early warning systems, LWS – landslide warning systems) sa budujú na globálnych, regionálnych a lokálnych úrovniach. Globálne vychádzajú zo zhodnotenia informácií o náchylnosti územia na zosúvanie (z hľadiska geologickej stavby a topografie), z analýzy seizmickej aktivity a zo spracovania aktuálnych zrážkových udalostí v čase i priestore (Hong a Adler, 2007). Takto zostavený systém môže byť priamo napojený na predpovede počasia, čo zabezpečuje pravidelnú informovanosť obyvateľstva o prípadnom zvýšenom nebezpečenstve aktivácie svahových pohybov v určitej oblasti.

Regionálne systémy sa vytvárajú v rámci jednotlivých krajín alebo ich častí, ktoré sú najviac ohrozené zosuvnými pohybmi. Vychádza sa z podobných princípov ako pri globálnych systémoch, tieto sú však spresňované ďalšími vstupujúcimi faktormi a vytvárajú sa modely rôznych úrovní varovania na základe dosiahnutia stanovených hodnôt pozorovaných faktorov. Takto vytvorené systémy včasného varovania pred zosuvnými udalosťami sa overujú napríklad v Taliansku (Rossi et al., 2009), v Kalifornii (Wilson, 2004), v Kolumbii (Huggel et al., 2008) a v ďalších krajinách.

V nadväznosti na doterajšie výsledky monitorovania reprezentatívnych lokalít na území celého Slovenska je okrem súčinnosti pri formovaní celoštátnych systémov varovania pred nepriaznivými prírodnými udalosťami najaktuálnejšou otázkou vznik lokálnych systémov včasného varovania pred nepriaznivými vplyvmi svahových pohybov. Treba upozorniť, že ide o veľmi širokú problematiku, na riešení ktorej sa podieľa viacero vedných odborov a ktorá sa v súčasnosti intenzívne rozpracováva. Na jej podrobnejšiu analýzu nie je v príspevku priestor a vyžaduje si samostatné spracovanie. Preto sú iba v prehľade uvedené hlavné zásady tvorby systémov včasného varovania pred zosuvnými pohybmi s dôrazom na tie aspekty, ktoré nevyhnutne vyžadujú vstup geologických informácií.

Základné zásady pre včasné varovanie boli postupne aplikované i v predchádzajúcom období monitorovania. Na základe stabilitných výpočtov sa na najdôležitejších monitorovaných lokalitách odvodila kritická úroveň hladiny podzemnej vody v jednotlivých pozorovaných vrtoch, pri ktorej je hodnota stupňa stability menšia ako 1. Takto určené kritické hladiny podzemnej vody dostali k dispozícii pozorovatelia, ktorí boli povinní o ich prípadnom prekročení okamžite informovať riešiteľov úlohy. Kvalitatívne významný pokrok v budovaní systémov včasného varovania pred zosuvnými pohybmi predstavovala inštalácia automatických hladinomerov s možnosťou nastavenia kritických úrovní hladiny podzemnej vody a s diaľkovým prenosom dát na celospoločensky významných lokalitách Veľká Čausa a Okoličné v roku 2005 (Wagner et al., 2006). Uvedené zariadenia majú všetky podstatné atribúty systému včasného varovania a po období skúšobnej prevádzky sú v súčasnosti nastavené na odvodené kritické úrovne hladiny podzemnej vody.

V nadväznosti na súbor existujúcich poznatkov treba v budúcnosti pri vytváraní a inštalácii lokálnych systémov včasného varovania pred aktiváciou svahových pohybov riešiť nasledujúce okruhy otázok:

– *Výber pozorovaných parametrov*, indikujúcich možnosť aktivácie svahového pohybu. Pretože v našich geologických a klimatických podmienkach sa za najspoločnejší indikátor zmeny stabilitného stavu svahu považuje stav hladiny podzemnej vody, najväčšia pozornosť sa venuje práve tomuto ukazovateľu a od neho sa odvíjajú rozhodnutia o kritickom stabilitnom stave prostredia. S rozvojom ďalších metód pozorovania však nemožno v budúcnosti vylúčiť ani odvodenia kritických posunov (napr. na základe geodetických meraní) alebo deformácií (napríklad na základe meraní kontinuálnou inklinometriou). Za veľmi dôležitý a potrebný krok v ďalšom vývoji monitorovania považujeme implementáciu mikroseizmických meraní do základného súboru pozorovaní na zosuvných územiach, ale predovšetkým v prostredí skalných stien a odvodenie rôznych úrovní varovania pre zaznamenané hodnoty vibrácií v horninovom prostredí.

– *Odvodenie kritických úrovní sledovaných parametrov*, ktoré je azda najdôležitejším a súčasne najkomplikovanejším problémom pri tvorbe systémov včasného varovania (Wagner et al., 2006; Ondrejka, 2009). Pritom ide o problematiku plne v kompetencii riešiaceho inžinierskeho geológa.

– *Vypracovanie overovacieho systému varovných signálov*, zabezpečujúceho elimináciu prípadných falošných varovaní a s tým súvisiacich dôsledkov.

– *Rozhodnutie o dostatočne reprezentatívnom umiestnení zariadenia* so systémom včasného varovania v rámci pozorovanej zosuvnej lokality, ktoré je výsostne geologickou problematikou. Vzhľadom na veľkú heterogénnosť zosuvných území z litologického i hydrogeologického hľadiska ide zvyčajne o veľmi komplikovanú otázku vyúsťujúcu často do poznania, že spoľahlivosť varovného systému pre celú lokalitu môže zabezpečiť iba viacero optimálne rozmiestnených zariadení.

K otázkam súvisiacim s inštaláciou systémov včasného varovania pred svahovými pohybmi, ktoré primárne nie sú v kompetencii riešiaceho inžinierskeho geológa, ale na riešení ktorých sa spolupodieľa, patrí:

– *výber optimálneho technického zariadenia* na zber a diaľkový prenos údajov;

– *legislatívne zabezpečenie a zakomponovanie* lokálneho systému do existujúcich varovných systémov v rámci miestnej samosprávy, ale i vyšších územných, vrátane celoštátnych celkov (systém civilnej ochrany, integrovaný záchranný systém a pod.);

– *príprava obyvateľstva na prípad mimoriadnej situácie*, ktorej dôležitosť bola preukázaná pri viacerých kritických udalostiach (Brigitte, 2009).

Každý z naznačených problémov predstavuje samostatný okruh otázok, ktorého riešenie je nevyhnutné v procese tvorby systémov včasného varovania, so špecifickými črtami pre každú konkrétnu lokalitu.

Záver

Monitorovanie súboru lokalít z celého územia Slovenska za cca 15 rokov umožnilo získať dlhé časové rady zmien pozorovaných hodnôt, analyzovať ich a hľadať medzi jednotlivými pozorovanými ukazovateľmi vzájomné závislosti. Takáto analýza je podmienkou prechodu na vyšší stupeň monitorovania, rozpracovávaný v súčasnosti na celom svete – systém včasného varovania pred nepriaznivými geodynamickými javmi. I keď rozsiahle varovné systémy sa v súčasnosti vytvárajú predovšetkým na ochranu pred tsunami a zemetraseniami, existuje viacero pokusných i prevádzkovaných zariadení na ochranu pred nepriaznivými dôsledkami svahových pohybov.

V príspevku sú zhrnuté predstavy autorov o ďalšom vývoji monitorovania svahových pohybov na Slovensku, vychádzajúce z vlastných dlhoročných skúseností, ale i z trendov budovania systémov včasného varovania pred svahovými pohybmi vo svete. Najväčšia pozornosť je sústredená na modernizáciu a aktualizáciu spôsobov zberu primárnych údajov. Ide predovšetkým o široké uplatnenie kontinuálneho zaznamenávania pozorovaných javov (zmien úrovne hladiny podzemnej vody, deformácií a pod.), ale i o zavádzanie prognostických metód, indikujúcich zmeny v horninovom prostredí pred vlastným vznikom porušenia (napríklad mikro seizmické merania vibrácií, ktorých zavedenie a overenie môže predstavovať

významný pokrok zvlášť v monitorovaní stabilného stavu skalných masívov).

Problematika tvorby samotných systémov včasného varovania pred svahovými pohybmi je veľmi široká a rôznorodá. Hlavné aspekty účasti geologických vied v tomto procese sú preto iba v stručnosti naznačené v záverečnej časti článku.

Predpokladá sa, že prezentované poznatky umožnia cielavedome vytvoriť optimálny program monitorovania svahových pohybov v nasledujúcom období, zahrnujúci aktualizáciu a modernizáciu zberu primárnych údajov i postupný systematický prechod na tvorbu systémov včasného varovania v jednotlivých pozorovaných lokalitách.

Literatúra

- ALBAA, M., BERNARDINIB, G., GIUSSANIA, A., RICCI, P. P., RONCORONIA, F., VALGOIC, M. & ZHANGD, K., 2008: Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, 133 – 139.
- BERACKO, I., 1980: Handlová – staré zosuvy. Záverečná správa zo sanačno-prieskumných prác. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra, 14*.
- BRIGITTE, L., 2009: Landslide impacts can be reduced. Press Release UNISDR Vol. 13 [online]. Geneva, IDNDR Secretariat, 12 August 2009 [cit. 2009-11-23], 2 s. Dostupné na internete: <http://www.unisdr.org/eng/media-room/press-release/2009/pr-2009-13-Landslide-Impacts-Can-Be-Reduced.pdf>
- DRUSA, M., CHEBEŇ, V., MUŽIK, J. & KÁLMÁNOVÁ, A., 2009: Nové trendy v geotechnickom monitoringu svahových deformácií. In: *Boštík, J. & Pazdera, L. (eds.): 12th Int. Scientific. Conference, TU Brno, 4*.
- FRAŠTIA, M., 2007: Pozorovanie stability skalného bloku v doline Suchá Belá, Slovenský raj. Geodetická dokumentácia. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra, 11*.
- FRAŠTIA, M., 2008: Kalibrácia a testovanie digitálnych kamier pre aplikácie blízkej fotogrametrie. *Bratislava, Vydavateľstvo STU, 114*.
- FRAŠTIA, M., 2009: Meranie geometrických vlastností horninového prostredia geodetickými a fotogrametrickými metódami. In: *Kohút, M. & Šimon, L. (eds.): Spoločný geologický kongres českej a slovenskej geologickej spoločnosti. Zborník abstraktov a exkurzný sprievodca, Bratislava, 62 – 63*.
- FUSSGÄNGER, E. & JADROŇ, D., 1977: Engineering geological investigation of the Okoličné landslide using measurement of stresses existing in soil mass. *Bull. IAEG (Krefeld), 16, 203 – 209*.
- GAJDOŠ, V. & WAGNER, P., 2005: Spôsob spracovania údajov z meraní presnej inklinometrie pri monitoringu svahových pohybov. *Miner. Slov. (Bratislava), 37, 563 – 568*.
- GRÓF, V., 2008: Metódy merania pórových tlakov vody. In: *Frankovská, J., Liščák, P. & Ondrášik, M. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. vedeckých prác zo VI. slovenskej konferencie s medzinárodnou účasťou. Vyd. Št. Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava, 146 – 151*.
- HOLKO, L., KOSTKA, Z. & PARAJKA, J., 2001: Snehová pokrývka. *Životné prostredie, 35, 138 – 142*.
- HONG, Y. & ADLER, R. F., 2007: Towards an early-warning system for global landslides triggered by rainfall and earthquake. *International journal of remote sensing, 28, 3 713 – 3 719*.
- HUGGEL, C., RAMÍREZ, J. M., CALVACHE, M., GONZÁLES, M., GUTIERREZ, C. & KREBS, R., 2008: A landslide early warning system within an integral risk management strategy for the Combeima-Tolima region, Colombia. *IDRC Davos, 273 – 276*.

- IGLÁROVÁ, L., WAGNER, P. & BARTOŠ, P., 2005: Metódy monitoringu stabilného stavu skalného zárezu na príklade lokality Demjata. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 37, 413 – 415.
- JADROŇ, D. & MOKRÁ, M., 1999: Havarijné zosuvy Hornej Nitry a Stredného Pohronia (Lokalita A – Veľká Čausa). *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 57.
- JÁNOVÁ, V. & LIŠČÁK, P., 2001: Súčasné metódy monitoringu procesov zvetrávania. In: *Klukanová, A. & Wagner, P. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. referátov z 2. konferencie. Vyd. Št. Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava*, 136 – 140.
- KLUKANOVÁ, A., 2002: Čiastkový monitorovací systém geologické faktory vo vzťahu k monitorovaciemu systému životného prostredia Slovenskej republiky. *Geol. Práce, Spr.*, 106, 15 – 19.
- KOPECKÝ, M. & MAGULA, P., 2005: 30 rokov monitoringu na Veľkomarskom zosuve (1974 – 2004) – analýza doterajších výsledkov a návrhy nových postupov. In: *Zbor. z konferencie 30 rokov sústavy vodných diel Liptovská Mara – Bešeňová. Piešťany, 2005*, 59 – 65.
- LEHOCKÝ, M., MACH, C. & DOLEJŠÍ, F., 1969: Morovno – Veľká Čausa – zosun. Sanačný inžinierskogeologický prieskum. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 10.
- MALGOT, J. & BALIAK, F., 1996: Svahové deformácie a ich vzájomná podmienenosť v rôznych geologických štruktúrach Slovenska. In: *Wagner, P. (ed.): Výskum, prieskum a sanácia zosuvných území na Slovensku, Nitrianske Rudno*, 7 – 13.
- MATEJKA, F. & HURTALOVÁ, T., 2001: Vplyv pôdnej vlhkosti na evapotranspiráciu. In: *Rožnovský, J. & Janouš, D. (eds.): Seminář SUCHO. Brno*, 7. Dostupné na internete: <http://www.chmu.cz/meteo/CBKS/sucho01/Matejka.pdf>
- MESKO, M., OTEPKA, J., MENZELOVÁ, O., NOVOTNÝ, P. & ŠTOFKO, S., 1985: Veľká Čausa – prieskumno-sanačné práce. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 40.
- NEMČOK, A., 1982: Zosuvy v slovenských Karpatoch. *Bratislava, Veda*, 319.
- ONDREJKA, P. & WAGNER, P., 2008: Analýza vývoja stabilného stavu zosuvného územia. In: *Frankovská, J., Liščák, P. & Ondrášik, M. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. vedeckých prác zo 6. slovenskej konferencie s medzinárodnou účasťou. Št. Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava*, 132 – 137.
- ONDREJKA, P., 2009: Analýza vzťahu medzi vypočítaným stupňom stability a pohybovou aktivitou na príklade zosuvu pri Okoličnom. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 41 (v tlači).
- OPEKA, J., TICHÝ, Š., ROHÁČIKOVÁ, A., FEKEČ, J. & OBERNAUER, M., 1976: Veľká Čausa – prieskum a sledovanie zosuvov. Predbežný inžinierskogeologický prieskum. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 79.
- PETRO, L., WAGNER, P. & POLAŠČINOVÁ, E., 2001: Výsledky dlhodobého monitoringu prúdového zosuvu pri Finticiach. In: *Klukanová, A. & Wagner, P. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. referátov z 2. konferencie. ŠGÚDŠ, Vyd. D. Štúra, Bratislava*, 131 – 135.
- PETRO, L., KOŠŤÁK, B., POLAŠČINOVÁ, E. & SPIŠÁK, Z., 1999: Monitoring blokových pohybov v Slanských vrchoch. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 31, 549 – 554.
- PETRO, L., VLČKO, J., ONDRÁŠIK, R. & POLAŠČINOVÁ, E., 2004: Recent tectonics and slope failures in the Western Carpathians. *Engng Geol. (Amsterdam)*, 74, 103 – 112.
- PONZIANI, F., BOSCHERINI, A., FELICIONI, G., MENCARONI, B., OGNA, M., SEVERI, A., SORRENTINO, A., TESORINI, M., TOCCACELLI, B., CARDINALI, R. & BUCCIOLI, A., 2008: Early warning system for rockfalls and landslides risk prevention. *Int. Geol. Congress, Oslo, Poster presentation*.
- ROSSI, M., PERUCCACCI, S., GUZZETTI, F., CARDINALI, M., REICHENBACH, P., ARDIZZONE, F., SALVATI, P., BRUNETTI, M. T., MONDINI, A., CORAZZA, A., LEONE, F. & TONELLI, G., 2009: Italian landslide early warning system. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU, Vienna*, 2 558.
- ŠIMEKOVÁ, J., MARTINČEKOVÁ, T. (red.), ABRAHÁM, P., BALIAK, F., CAUDT, L., GEJDOŠ, T., GREŇČIKOVÁ, A., GRMAN, D., HRAŠNA, M., JADROŇ, D., KOPECKÝ, M., KOTRČOVÁ, E., LIŠČÁK, P., MALGOT, J., MASNÝ, M., MOKRÁ, M., PETRO, L., POLAŠČINOVÁ, E., RUSNÁK, M., SLUKA, V., SOLČIANSKY, R., WANIEKOVÁ, D., ZÁTHURECKÝ, A. & ŽABKOVÁ, E., 2006: Atlas of slope stability maps of the Slovak Republic 1 : 50 000. *Publ. Ministry of the Environment of the Slovak Republic, Bratislava/INGEO-ighp s. r. o., Žilina*.
- VAŘILOVÁ, Z. & ZVELEBIL, J., 2005: Sandstone relief geohazards and their mitigation: Rock fall risk management in the Bohemian Switzerland National Park. In: *Christian, R. & Krippel, Y. (eds.): Sandstone landscapes in Europe: Past, Present and Future. Vianden*, 53 – 38.
- VLČKO, J., GREIF, V. & HENČELOVÁ, L., 2006: Inžinierskogeologické posúdenie stability hradného brala NKP Devín. In: *Wagner, P., Klukanová, A. & Frankovská, J. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. abstraktov z V. konferencie. Bratislava*, s. 15 (CD ROM – 12 s.).
- VYBÍRAL, V. & WAGNER, P., 2002: Interpretácia výsledkov meraní poľa PEE pri monitorovaní svahových deformácií. In: *Klukanová, A. & Hrašna, M. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. referátov z 3. konferencie. ŠGÚDŠ, Vyd. D. Štúra, Bratislava*, 31 – 34.
- WAGNER, P., IGLÁROVÁ, L. & PETRO, L., 2000: Methodology and some result of slope movements monitoring in Slovakia. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 32, 359 – 367.
- WAGNER, P., IGLÁROVÁ, L., PETRO, L. & SCHERER, S., 2002: Monitorovanie zosuvov a iných svahových deformácií. *Geol. Práce, Spr.*, 106, 21 – 42.
- WAGNER, P. & PAUDITŠ, P., 2002: Complete evaluation of landslide activity. In: *Michalík, J., Šimon, L. & Vozár, J. (eds.): Proc. of the XVII. Congress of CBGA, Bratislava. Geol. Carpath.*, 53, Spec. issue (CD-ROM, 6 s.).
- WAGNER, P., ONDREJKA, P. & BJEL, D., 2006: Systémy včasného varovania na zosuvných územiach. In: *Wagner, P., Klukanová, A. & Frankovská, J. (eds.): Geológia a životné prostredie. Zbor. abstraktov z V. konferencie. Bratislava*, s. 14 (CD nosič 13 s.).
- WILLENBERG, H., SPILMANN, T., EBERHARDT, E., EVANS, K., LOEW, S. & MAURER, H. R., 2002: Multidisciplinary monitoring of progressive failure processes in brittle rock slopes: Concepts and system design. In: *Rybář, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds.): "Landslides". Proc. The first European Conference on Landslides. A. A. Balkema*, 477 – 483.
- WILSON, R. C., 2004: The rise and fall of a debris-flow warning system for the San Francisco Bay Region, California. In: *Glade, T., Anderson, M. & Crozier, M. J. (eds.): Landslide hazard and risk. John Willey and sons, chapter 17*, 493 – 516.
- ZÁRUBA, Q. & MENCL, V., 1987: Sesuvy a zabezpečování svahů. *Praha, Academia*, 338.

Rukopis doručený 3. 12. 2009

Revidovaná verzia doručená 18. 1. 2010

Rukopis akceptovaný red. radou 7. 9. 2010

Current trends in the monitoring of slope movements

Many years of experience confirm that the knowledge of the development of slope movements activities and the early prevention against their unfavourable effects is possible on the results of monitoring of the phenomena that directly or indirectly characterize the current state of the slope stability.

Monitoring of slope movements was a part of the engineering geological investigation in unstable areas in the past; usually applied during and after realization of corrective measures to verify their effectiveness and functionality. Areal monitoring of landslides and other slope deformations is currently carried out at selected localities from all over Slovakia in the frame of the project "Partial monitoring system of geological factors", whose customer is the Ministry of Environment of the Slovak Republic and is coordinated by the State Geological Institute of Dionýz Štúr (Klukanová, 2002).

Monitoring methods used in solving of this project, as well as in usual engineering geological practice are summarized in Tab. 1. Presentation of monitoring results in the past and present have usually the form of time series of observed changes in the parameters and give an information about the development and the relationship between various observed parameters (Fig. 1). On some sites the results of monitoring at this stage of data collection have already contributed to the practical solutions of the unfavourable conditions of observed slopes (Wagner et al., 2002). For example, in the Slovenský raj area (Slovak Paradise – the Suchá Belá valley) a tourist pavement was removed away from an unstable rock block based on

repeated photogrammetric measurements and evaluation (Fig. 2).

Because of the significant advances in methods of collecting and processing data from monitoring measurements it is necessary to expand and improve the methods of the slope movements monitoring in the future. Perspective data collection methods are summarized in Table 1 and their description is a relevant part of the paper.

Regarding to landslides, there is mainly expected the application of the remote sensing methods, continual inclinometry, and methods of measurement of vibration in the rock or soil mass by microseismic methods. From the landslide triggering factors it is necessary to include into the monitoring program the measurements of pore pressures, the character of snow cover and soil moisture.

In the monitoring of rock fall indication there is expected the gradual application of automatic dilatometers and modern photogrammetric methods (mainly terrestrial laser scanning technology – Fig. 3). Early identification of the changes of rock mass stress state before its own failure may be recorded by the microseismic measurements (Ponziani et al., 2008).

Monitoring of the creep slope movements is realized by the TM-71 optical-mechanical dilatometers. This method is sufficiently proved and can be recommended in the future.

The obtaining of the sufficient information on the state of monitored slope will gradually enable to move to a higher level of monitoring – the creation and installation of the early warning systems for the slope movement. The set of questions related to this problem is summarized at the end of the paper.