

## GPS MONITORING – NÁSTROJ NA HODNOTENIE RECENTNEJ DYNAMIKY ZOSUVOV

Roberta Prokešová\*, Alžbeta Medvedová\*\*

\* Univerzita Mateja Bela, Ústav vedy a výskumu, Cesta na Amfiteáter 1, 974 01 Banská Bystrica,  
roberta.prokesova@umb.sk

\*\* Univerzita Mateja Bela, Fakulta prírodných vied, Katedra geografie a krajinej ekológie, Tajovského 40,  
974 01 Banská Bystrica, medvedov@fpv.umb.sk

### GPS monitoring as a tool for assessment of recent landslide dynamics.

This paper reports the results of the Global Positioning System (GPS) survey that has been used to measure landslide surface displacements. We analysed surface displacements obtained from five GPS campaigns carried out from April 2007 till April 2009 on a network of 42 points in the Ľubietová landslide. The results reveal cumulative displacements of up to 0.035–0.045 m depending on stabilization depth of points. Although the amplitudes of displacements are not so high as in previous monitoring intervals, they delineate several active areas in the landslide body. The relatively small current displacements can be explained by several reasons including the relatively low amount of cumulative rainfall in winters during the assessed period as the most probable.

**Key words:** landslide, monitoring, GPS, horizontal displacement

### ÚVOD

Svahové deformácie a zosuvy patria k najčastejšie sa vyskytujúcim geodynamickým fenoménom na Slovensku (Malgot a Balaik 2002). Hoci ich prejavov nie sú také katastrofické ako v iných oblastiach sveta, spôsobujú každoročne nemaľé hospodárske škody. Podľa najjednoduchšej definície navrhnutej Crudenom (1991) zosúvanie je gravitáciou riadený pohyb masív hornín, pôdy alebo sutín dolu svahom. Dalo by sa teda predpokladať, že k vývoju zosuvných pohybov dochádza na strmých exponovaných svahoch. Najparadoxnejšou črtou zosuvov však je, že neraz dochádza k ich rozvoju aj na svahoch s relatívne veľmi malým sklonom ( $<10^\circ$ ), ktoré na prvý pohľad pôsobia dojmom stabilného územia. Priaznivá geologická stavba môže aj tu vytvoriť podmienky vhodné pre vznik zosuvov. Najčastejšie k tomu dochádza na svahoch so superpozíciou pevných rigidných hornín na mechanicky „slabších“ polohách s nízkou šmykovou pevnosťou (napríklad ilovce alebo slabo spevnené sedimenty), kde je rovnováha veľmi krehká a môže byť ľahko narušená (Nemčok 1982). Typickým príkladom takýchto zosuvných areálov na Slovensku je územie na ľavom brehu Hutnej pri obci Ľubietová, ale aj iné oblasti na okrajoch neovulkanických pohorí (napríklad horná Nitra). Je preto žiaduce takéto územia sledovať, najmä ak v nich v minulosti už došlo k rozvoju významnejších zosuvných udalostí.

Metódy monitoringu sú stále najefektívnejším nástrojom na sledovanie zosuvných území a hodnotenie zosuvných rizík. V zosuvných oblastiach možno sledovať množstvo ich prejavov, od monitorovania povrchových topografických zmien, cez sledovanie podpovrchových deformácií až po režimové pozorovanie.

Účinnými nástrojmi na získanie objektívneho obrazu o celkovej kinematike svahových pohybov, t. j. ich veľkosti, smerov, rýchlosťi, resp. zrýchlení a spomalení, sú geodetické metódy a metódy DPZ (najmä fotogrametrické metódy). Kým fotogrametrickými metódami možno získať údaje o celkovej dynamike pohybov s presnosťou rádovo niekoľko decimetrov až metrov (napr. Prokešová et al. 2010), periodické bodové merania vykonané geodetickými metódami umožňujú registrovať s dostatočnou (subcentimetrovou) presnosťou aj relatívne pomalé „plazivé“ pohyby a kontrolovať tak stabilizovanie, resp. reaktivizáciu svahovej deformácie, účinnosť priatých sanačných opatrení a pod.

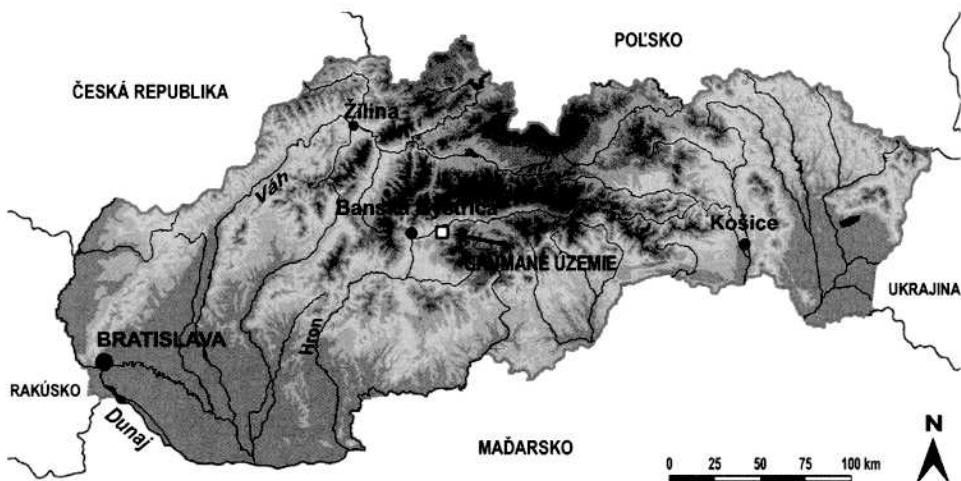
Aplikácia metód satelitnej geodézie pri monitoringu deformácií zemského povrchu získavala vo svete od konca 90. rokov čoraz väčšiu popularitu. Spomenuté metódy sa úspešne použili pri sledovaní kôrových deformácií (napr. Peler et al. 1998, Wendt a Ditrich 2002) a tektonických zlomov (Newmann et al. 1999), pohybu ľadovcov (Sjoberg et al. 2000) a tento trend možno sledovať aj v oblasti monitoringu svahových pohybov (napr. Gili et al. 2000, Malet et al. 2002, Coe et al. 2003 a Squarzoni et al. 2005). Výsledky uvedených autorov naznačujú, že metódy Global Positioning System (GPS) majú potenciál stať sa nielen vhodným doplnkom použitia klasických geodetických metód, ale aj ich plnohodnotnou alternatívou. V prípade aplikácie metódy relatívneho určenia polohy bodu v tzv. statickom móde s postprocesingovým vyhodnotením zberaných dát sa presnosť určenia polohy monitorovacieho bodu môže pohybovať na subcentimetrovej úrovni (Gili et al. 2000 a Malet et al. 2002). Na rozdiel od záhraničia, nie je aplikácia GPS metód pri opakovanom zameriavaní monitorovacej siete v zosuvnom území na Slovensku zatiaľ bežne využívaná. Využitie GPS metód pritom prináša viacero výhod, ku ktorým popri vysokej presnosti a efektívnosti v neposlednom rade patrí aj to, že ide o užívateľsky prístupnú technológiu. Meranie pomocou geodetických GPS prístrojov samozrejme tiež vyžaduje zvládnutie základných poznatkov a metodických postupov, no na rozdiel od klasických geodetických metód nie je natol'ko závislé od subjektívnych zručností a skúseností geodeta. Technologický pokrok navyše prináša na trh čoraz dokonalejšie a presnejšie prístroje, čo spolu s inštaláciou nových satelitných systémov (GLONASS a GALILEO) vedie k čoraz presnejším a spoľahlivejším výsledkom.

V príspevku sa venujeme analýze a interpretácii dát získaných GPS merania bodového poľa monitorovacích (objektových) bodov, rozmiestnených na telese „katastrofálneho“ Ľubietovského zosuvu, resp. v jeho okolí, počas obdobia dvoch rokov (apríl 2007 – apríl 2009).

## SKÚMANÉ ÚZEMIE

Skúmané územie je lokalizované na severovýchodnom okraji stredoslovenských neovulkanítov (obr. 1) pri obci Ľubietová, ktorá je odbornej verejnosti oddávna známa najmä vďaka svojmu nerastnému bohatstvu. V širšom kontexte geomorfologického členenia Vnútorných Západných Karpát leží skúmané územie na hranici oblastí Slovenské stredohorie a Slovenské rudoohorie (Mazúr a Lukniš 1986). Predmetom štúdia sú ľavobrežné svahy toku Hutná (ľavostranného prítoku Hrona), charakteristické viacerými typmi gravitačných procesov od blokových rozpadlín v horných častiach svahov až po prúdové zosuvy v ich

predpolí. Riečny bazén Hutnej sa rozprestiera na rozhraní negatívnych morfoštrukturálnych blokovej štruktúry Slovenského stredohoria a semimasívnej rudohorskej morfoštruktúry (Mazúr et al. 1980). Morfologickou hranicou pozitívnych a negatívnych morfoštruktur je os doliny Hutnej, ktorej dolný tok je založený na zlomovej línií regionálneho významu, tzv. Vážňanskom zlome (Polák et al. 2003). Teleso samotného zosuvu sa nachádza na hranici geomorfologickej celkov Zvolenská kotlina a Veporské vrchy v centrálnej časti bazénu a je súčasťou zniženia erózno-tektonického pôvodu v podcelku Povraznická brázda (Mazúr a Lukniš 1986). Predmetné územie navýše leží v blízkosti jedného z najvýznamnejších neotektonických elementov Západných Karpát – stredoslovenského zlomového systému (Hók et al. 2000), prejavujúceho sa výrazným postihnutím západokarpatskej neotektonickej klenby z hľadiska výškovej diferenčiácie aj horizontálnych posunov (Minár et al. 2010).



Obr. 1. Lokalizácia skúmaného územia

Geologická stavba bazénu je charakteristická tektonickým alebo stratigrafickým kontaktom niekoľkých geologických jednotiek. Geologické podložie tvoria horniny severoveporského kryštalínika a jeho permotriásového obalu. V zniženine v okolí Lubietovej vystupujú v nadloží vaporika a v podloží neogénnych vulkanítov paleogénne a neogénne sedimenty. Najstaršie paleogénne sedimenty predstavuje pieskovcovovo-zlepencová litofácia, sedimenty spodného miocénu tvoria štrky, zlepence, piesky, pieskovce, silty, íly a ilovce. Významne sú zastúpené spodnobádenské sedimenty kordíckeho súvrstvia. Neovulkanické komplexy (produkty neogénnnej aktivity stratovulkánu Poľana, vrchný báden – stredný sarmat) v území zastupujú andezitové epiklastické brekcie a konglomeráty formácie Šútovka (Polák et al. 2003). Najmladšími sedimentmi sú kvartérne eluviálno-deluviálne sedimenty (hlinité zvetraliny, svahové hliny a sutiny).

Existencia gravitačných deformácií v predmetnom území úzko súvisí s jeho polohou na rozhraní morfoštruktur s rozdielnou tektonickou aktivitou (Maglay et al. 2002). Časovo-priestorová organizácia geomorfologickej procesov a fo-

riem je jasnejšia, ak sa na ňu pozéráme z hľadiska hierarchického reťazenia – štúdiom „geomorfologických katén“ (Urbánek 2009). Odlišná intenzita a smer vertikálnych pohybov relativne poklesávajúcej Zvolenskej kotliny (Hron a do neho zaústujúca Hutná) a vyzdvihujúcich sa morfoštruktúr Poľany a Veporských vrchov (severná a južná – pramenná časť povodia) sa odrážajú v reakcii fluviálneho systému Hutnej. Paradynamický systém následne prepájajúci celý bazén procesmi spätej erózie rozplavuje celá zosuvov a naruša tak stabilitu svahov. Geologická stavba Ľubietovskej depresie zvýraznená eróznym odkrytím kontaktu geologickej odlišnej horninových komplexov je v súčinnosti s ďalšími faktormi (zrážky, ľudská aktivita, apod.) hlavnou príčinou zosúvania.

Prvé zmienky o výskyte zosuvov v predmetnej lokalite možno nájsť v prácach zo 60. rokov minulého storočia (Losert 1960 a Malgot 1969). V ostatných desaťročiach došlo v tejto oblasti k aktivizácii niekoľkých zosuvných telies, z ktorých najznámejší je zosuv „Za Viselníkom“, označovaný prívlastkom „katastrofálny“ (Nemčok 1982) vďaka materiálnym škodám, ktoré spôsobil. Zosuv sa aktivizoval koncom februára 1977 a katastrofe spojenej s prehradením toku Hutná zabránili len rýchle sanačné práce. Za hlavný spôsobiaci faktor katastrofálneho Ľubietovského zosuvu je považovaná zrážková anomália od decembra 1976 do februára 1977. Prekročenie mesačných zrážkových úhrnov o 50 až 120 % viedlo k reaktivizácii zosuvu zmenou pomalého krípu na zosuvný pohyb s rýchlosťou 2,5 m za deň (Fussgänger et al. 1978 a Nemčok 1982). Je však zrejmé, že ku vzniku zosuvu výrazne prispeli aj neuvážené zásahy človeka, najmä odlesnenie a nevhodná úprava svahu za účelom poľnohospodárskeho využitia. Už v prvej polovici minulého storočia bolo takmer celé územie zosuvu využívané ako mozaika polí, pasienkov a lúk. Od začiatku 70. rokov minulého storočia prebiehali v lokalite poľnohospodárske úpravy súvisiace s kolektivizáciou. Použitie ľahkých mechanizmov pri obrábaní pôdy viedlo k narušeniu až znefungčneniu prirodzeného drenážného systému na svahu, v minulosti už postihnutom zosuvnými procesmi (Malgot a Baliak 2002). Tieto skutočnosti, popri spomínanej zrážkovej anomálii, tiež významne prispeli k porušeniu stability územia. Podrobnejšie informácie o charaktere okolitého územia ako aj samotného zosuvu možno nájsť vo viacerých prácach (napr. Fussgänger et al. 1978, Nemčok 1982, Jelínek 2005, Medveďová et al. 2008 a Prokešová et al. 2010).

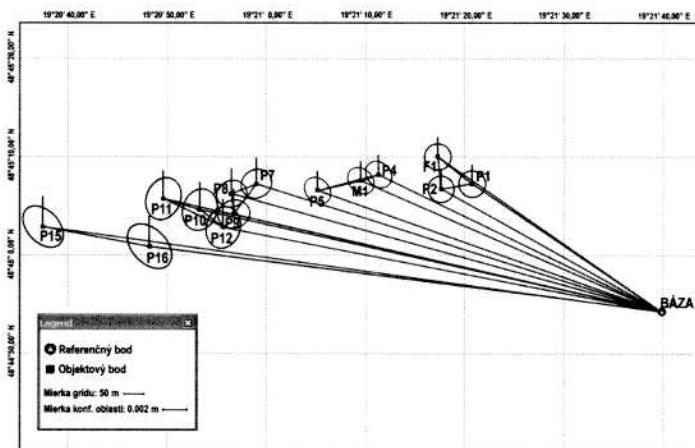
Čelo katastrofálneho zosuvu, ako aj celé zosuvné územie pri Ľubietovej, zasahuje priamo do intravilánu obce. V prípade aktivizácie výrazných pohybov znova hrozia značné materiálne škody. Je preto potrebné neustále monitorovať celý kritický úsek, no najmä samotné teleso katastrofálneho zosuvu.

## METODIKA

### GPS merania a ich spracovanie

Geodetické monitorovacie siete pozostávajú zo systému pohyblivých monitorovacích, čiže objektových bodov (OB) a stabilných kontrolných, tzv. referenčných bodov (RB) – pozri Šütti a Weiss (1996). V roku 1988 bola pre potreby monitoringu na území Ľubietovského zosuvu inštalovaná siet geodetických bodov, pozostávajúca z 25 objektových bodov „P“ a 5 stabilných bodov „F“ v jeho blízkom okolí. Body sú stabilizované pomocou oceľových pažníc, zabudovaných do hĺbky 3 m, a betónového stabilizačného venca. Siet bola premeriavaná

približne raz za dva roky použitím klasických geodetických metód, pričom posledné meranie sa uskutočnilo v roku 2006. Zhodnotené výsledky meraní s veľkosťami posunov OB v jednotlivých etapách sú dostupné na stránke Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra v Bratislave (ŠGÚDŠ 2009). Databáza, žiaľ, neposkytuje informácie o orientácii uvádzaných posunov, len o ich veľkosti. V rámci riešenia výskumného projektu sme v skorých jarných mesiacoch 2007 inštalovali na území zosuvu nových 25 OB (označených ako „T“) stabilizovaných oceľovými tyčami do hlbky 1,5 m. V jesenných mesiacoch 2007 sme doplnili monitorovaciu sieť ešte o 10 OB (označených ako „M“), stabilizovaných do hlbky 0,6 m. Takto pripravenú sieť monitorovacích bodov sme využili na sledovanie povrchových posunov pomocou metód GPS. Našim cieľom bolo získať údaje o veľkosti povrchových posunov, ako aj o hĺbkovom dosahu týchto posunov. Vzhľadom na členitosť terénu telesa zosuvu, rýchlo postupujúcej sukcesii, v súčasnosti pokrývajúcej podstatnú časť zosuvu (obr. 2), a zvolenú metodiku, nebolo možné dodržať niektoré metodické zásady budovania geodetickej sieti na zosuvných územiach (Šütti a Weiss 1996). Upustilo sa od inštalácie OB v líniah kolmých na generálny smer zosúvania a nové OB boli inštalované na voľnom priestranstve tak, aby bol umožnený čo najlepší príjem družicových signálov. Z rovnakého dôvodu bolo možné využiť na GPS merania len niektoré body pôvodnej geodetickej siete. Lokalizáciu všetkých OB použitých na účely monitoringu na území zosuvu v rokoch 2007-2009 ilustruje obr. 2.



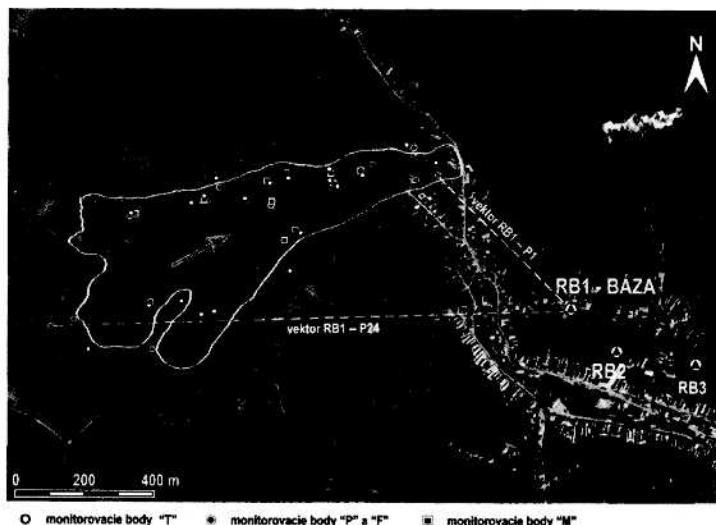
Obr. 2. Príklad zameriavania vektorov v sésiach

Kým body „P“ a „F“ sú vo vrchnej časti opatrené oceľovou platňou so závitnicou umožňujúcou priamu inštaláciu geodetickej podložky s libelou a geodetickej prístroja (v našom prípade GPS), centráciu na bodoch „T“ a „M“ sme uskutočňovali pomocou statív a karbónovej výtyčky s libelou. Pri zvolenej GPS metode relatívneho zameriavania polohy OB, je potrebné realizovať a vyhodnocovať GPS merania vzhľadom k stabilnému referenčnému bodu (tzv. báze). Vzhľadom na naše pochybnosti o stabilité referenčných bodov F pôvodnej siete, rozmiestených v okolí zosuvného telesa (čo čiastočne potvrdili naše mera-

nia), pristúpili sme k vybudovaniu troch nových RB na stabilnom protiľahlom svahu (inštalácia troch, prípadne viacerých RB umožňuje priebežnú kontrolu stability hlavného RB). Všetky tri referenčné body sú stabilizované obdobne ako body pôvodnej geodetickej siete (do hlbky 3 m) tak, aby sa zabezpečila ich stabilita a požiadavky na presnosť centrácie.

Vzdialenosť meraných vektorov (základníc) medzi bázou a OB sa pohybuje v rozpätí 0,56-1,48 km, čo sú hodnoty optimálne pre dosiahnutie presných výsledkov aj pri použití jednofrekvenčných GPS prístrojov. Na príjem družicových signálov sme využili presné a spoľahlivé jednofrekvenčné geodetickej GPS prístroje typu Stratus (Sokkia) a ProMark3 (Magellan), zapožičané firmou ORNTH, s.r.o. Presnosť oboch prístrojov udávaná výrobčami je  $\pm 0,005 \text{ m} + 1 \text{ ppm}$  v určení polohových súradníci a  $\pm 0,01 \text{ m} + 1 \text{ ppm}$  v určení výšky (Sokkia 2009 a Magellan 2009).

Určovanie súradníc OB sme realizovali metódou relatívneho určovania polohy bodu (relative positioning) vzhladom k zvolenému RB (báza-1) s presne určenými súradnicami. Metóda relatívneho merania vyžaduje použitie minimálne dvoch prístrojov súčasne. Jeden je inštalovaný na RB s vopred presne určenými súradnicami, čo umožňuje korekciu chýb, či už v reálnom čase alebo v postprocesingu, pričom druhý spôsob poskytuje o presnejšie výsledky (Gili et al. 2000). Spracovaním nameraných dát pomocou príslušného softvéru sa získa smer a dĺžka vektora spojnice referenčného a objektového bodu v geocentrickom súradnicovom systéme, ktorý je ďalej použitý na výpočet súradníc OB. Pri súčasnom zameriavaní viacerých OB sa získajú „nadbytočné“ vektorov medzi jednotlivými OB, ktoré umožňujú ďalšie spresnenie výpočtu ich súradníc.



Obr. 3. Aktuálny pohľad na územie zosuvu s vyznačenou hranicou reaktivácie z roku 1977, generálnym smerom zosúvania, lokalizáciou zameriavaných monitorovacích bodov i referenčných bodov a vektorom najkratšej a najdlhšej základnice

Merania sme uskutočnili v 3- až 4-dňových meracích kampaniach. Celkovo bolo realizovaných 5 meracích kampaní v 6-mesačných intervaloch (vždy v apríli a októbri). Observácie v rámci každej meracej kampane sme realizovali v tzv. sésiách (obr. 3) – príjem drúžicových signálov prebiehal súčasne na 3 OB s časom snímania signálu od 30 do 60 minút v závislosti od počtu satelitov, polohového faktora zníženia presnosti (PDOP) a charakteru terénu v okolí OB. Hodnota PDOP počas meraní sa pohybovala v rozpätí 1,2-1,9 (výnimcoľ do 2,4), čo sú hodnoty všeobecne považované za priaznivé (Sedlák et al. 2007). Namerané dátá sme spracovávali v režime post-procesingu použitím softvérov Ashtech Solution v. 2.6 a Spectrum Survey v. 3.10.

### Metodika hodnotenia polohových zmien

Priestorové (3D) súradnice (tiež geodetické, resp. elipsoidické) získané metódou GPS sa určujú v geodetickom súradnicovom systéme WGS-84. V bežnej praxi je nutné tieto súradnice transformovať do niektorého zo záväzných súradnicových systémov (najčastejšie S-JTSK alebo ETRS89). Pri transformácii však dochádza k zníženiu presnosti (napr. Hankovský 2000). Vzhľadom na predpokladané malé polohové zmeny OB na monitorovanom zosuve bolo nutné predísť strate presnosti. Zhodnotenie polohových zmien OB lokálnej monitorovacej siete sme vykonali prepočtom zistených súradnicových zmien OB na dĺžkové jednotky (metre). K tomu bolo potrebné vypočítať hodnotu jednej uhlovej sekundy v metroch pre geodetickú šírku ( $\phi$ ) a geodetickú dĺžku ( $\lambda$ ). Pri výpočte sme vychádzali z hodnôt hlavnej a vedľajšej osi referenčného elipsoidu WGS-84 ( $R_a = 6\ 378\ 137,0$  m;  $R_b = 6\ 356\ 752,315$  m). Berúc do úvahy rovníkový polomer  $R_a$  určili sme hodnotu jednej uhlovej sekundy v smere geodetickej dĺžky v oblasti rovníka zo vzťahu:

$$1''(\lambda) = 2\pi R_a / 360 / 3600 = 30,91 \text{ (m).} \quad (1)$$

Vzhľadom na zbiehavosť poludníkov je potrebné vypočítať hodnotu jednej dĺžkovej uhlovej sekundy pre strednú zemepisnú šírku skúmaného územia ( $48^{\circ}45'00''$ ). Postup je podobný ako v prvom prípade, avšak namiesto hodnoty rovníkového polomeru ( $R_a$ ) vo vzťahu (1) použijeme hodnotu polomeru danej rovnobežky ( $R_{a(48)}$ ):

$$R_{a(48)} = \cos 48^{\circ}45'00'' \cdot R_a = 20,38 \text{ (m).}$$

Pri výpočte hodnoty jednej uhlovej sekundy v smere geodetickej šírky sme do vzorca (1) dosadili hodnotu vedľajšej osi referenčného elipsoidu  $R_b = 6\ 356\ 752,315$  m. Hodnota jednej uhlovej sekundy  $1''(\phi)$  je 30,82 m.

Kedže vypočítané diferencie súradníč OB sa v jednotlivých etapách líšili maximálne v tisícinách sekundy, vypočítané dĺžkové hodnoty uhlových sekúnd postačujú na prepočet diferencií so sub-milimetrovou presnosťou.

Grafické vyhodnotenie posunov sme realizovali s použitím on-line softvérovej aplikácie Výskumného ústavu geodetického, topografického a kartografického (Talich 2007, Talich a Havrlant 2008 a VUGTK 2009).

## VÝSLEDKY A DISKUSIA

### Získané dát a ich presnosť

Aby bolo možné interpretovať získané výsledky s určitým stupňom spoľahlivosti (napr. 95 %, 99 %) je potrebné stanoviť ich presnosť. Teoretická presnosť súradníc určených geodetickými GPS prijímačmi statickou metódou relativného merania je pri každom prístroji deklarovaná výrobcom. Pri väčšine moderných prístrojov sa uvádzajú hodnoty  $\pm 0,005 \text{ m} + 1 \text{ ppm}$  v určení polohových súradníc a  $\pm 0,01 \text{ m} + 1 \text{ ppm}$  v určení výšky (napr. Sokkia 2009 a Magellan 2009). Presnosť súradníc (ako aj presnosť vektorov) je vyhodnocovaná metódou najmenších štvorcov samotným softvérom, použitým pri post-procesingu. V našom prípade sa vnútorná presnosť vyrovnaných súradníc pohybovala v rozmedzí  $\pm 1\text{-}3 \text{ mm}$  pre polohové súradnice a  $1\text{-}5 \text{ mm}$  pre výšku. Reálnu presnosť súradníc meraných bodov ovplyvňujú aj ďalšie faktory vrátane ľudských omylov (napr. chybne odčítanie výšky antény v teréne, chybne zadanie výšky fázového centra pri výpočte, chybne zadanie súradníc referenčného bodu a pod.). Presnosť centrácie prístroja nad bodom môže skutočnú presnosť získaných hodnôt znížiť o niekoľko mm najmä v prípade, že pri meraní požijeme výtyčku so statívom. Kontrola libely na výtyčke (jej správna rektifikácia) je klúčová pri eliminácii tejto chyby, respektívne jej redukcií na čo najnižšiu hodnotu. Avšak aj v prípade maximálnej eliminácie všetkých uvedených zdrojov chýb je reálne vyhodnotenie dosiahnutej presnosti užitočné pre interpretáciu nameraných dát.

Na stanovenie reálnej presnosti dát získaných GPS observáciami sme použili dve metódy. Prvá metóda bola založená na hodnotení „zdanlivých“ posunov OB premeriavaných v krátkom časovom intervale, čiže v rámci jednej meracej kampane. Keďže medziročné hodnoty posunov OB v súčasnosti neprekračujú (a ani v ostatných rokoch neprekračovali) hodnoty niekoľko mm až niekoľko cm, predpokladáme, že pri určovaní polohy OB s časovým rozostupom niekoľkých hodín, resp. 1-2 dní, možno hodnoty ich polohových a výškových zmien považovať za zanedbateľné, teda rovné „0“. Hodnoty „zdanlivých“ posunov, čiže diferencií súradníc opakovane zameraných bodov potom možno použiť na štatistické zhodnotenie reálnej presnosti. Pri druhom spôsobe stanovenia reálnej presnosti meraných dát sme vychádzali z predpokladu, že všetky tri referenčné body sú stabilné. Zameraním dvoch kontrolných RB (RB-2 a RB-3) počas každej meracej kampane sme získali polohové a výškové diferencie, ktoré sme štatisticky vyhodnotili. Ako je zrejmé z tab. 1, výsledky získané jednotlivými metodami sa mierne líšia. Hodnotenie presnosti získaných výsledkov si zaslhuje hlbší rozbor, čo nie je predmetom tejto štúdie a budeme sa mu venovať v inej práci (Prokešová et al. 2010.). V tab. 1 a 2 uvádzame sumarizované výsledky štatistického vyhodnotenia – hodnoty maximálnych polohových a výškových diferencií, zaznamenané počas našich meraní a stanovené konfidenčné intervaly pre hodnotenie polohových zmien. Keďže žiadna z polohových diferencií výrazne neprekročila priemerné hodnoty a súbory neboli zatiažené odľahlými hodnotami (outliers), považovali sme tieto maximálne diferencie za reálne, indikujúce možnosti použitej metodiky a zohľadnili sme ich pri stanovovaní konfidenčných intervalov pre hodnotenie reálnych diferencií (tab. 2).

**Tab. 1. Hodnoty stredných chýb a konfidenčné intervaly pre polohovú a výškovú presnosť súradníc monitorovacích bodov**

|                       | Hodnoty stredných chýb (m) |                 | 99 % intervaly (m) |       | Priemer (m) |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|-------|-------------|
|                       | RB <sup>1</sup>            | OB <sup>2</sup> | RB                 | OB    |             |
| $m_x$                 | 0,0062                     | 0,0041          | 0,016              | 0,010 | 0,013       |
| $m_y$                 | 0,0036                     | 0,0039          | 0,010              | 0,010 | 0,010       |
| $m_z$                 | 0,0055                     | 0,0078          | 0,014              | 0,020 | 0,017       |
| $m_{xy}$ <sup>3</sup> | 0,0072                     | 0,0057          | 0,019              | 0,015 | 0,017       |

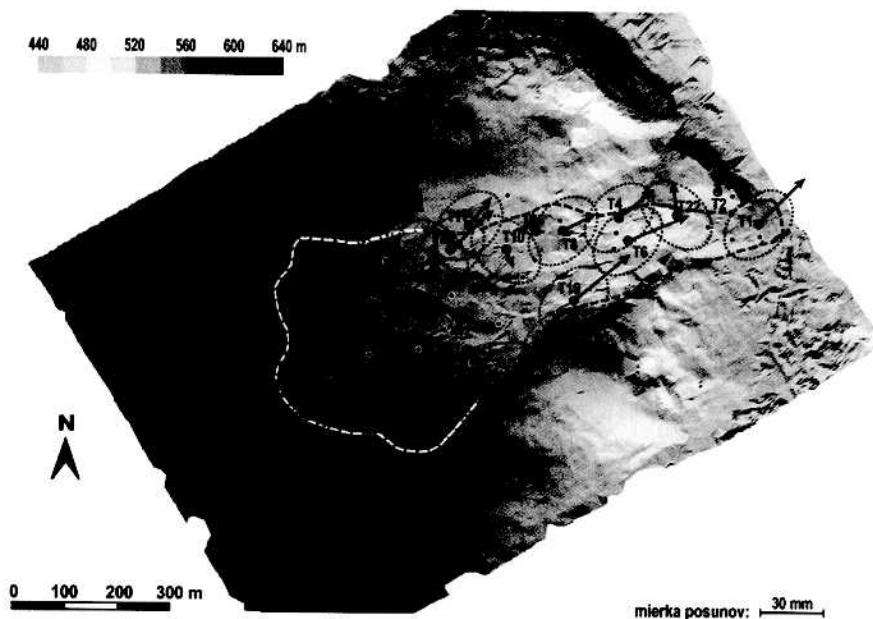
<sup>1</sup> počet meraní = 8<sup>2</sup> počet meraní = 24<sup>3</sup> hodnoty sú vypočítané zo vzťahu  $m_{xy} = (m_x^2 + m_y^2)/2$ **Tab. 2. Maximálne hodnoty polohových a výškových diferencií a stanovené konfidenčné intervaly na hodnotenie polohových diferencií**

|             | Maximálne hodnoty |       | Stanovené 95 % a 99 % intervaly pre hodnotenie diferencií <sup>1</sup> (m) |       |
|-------------|-------------------|-------|--|-------|
|             | RB                | OB    | RB   | OB    |
| $\Delta X$  | 0,015             | 0,016 | 0,012  | 0,016 |
| $\Delta Y$  | 0,012             | 0,015 | 0,012  | 0,016 |
| $\Delta Z$  | 0,023             | 0,045 | —  | —     |
| $\Delta XY$ | 0,015             | 0,019 | 0,015  | 0,019 |

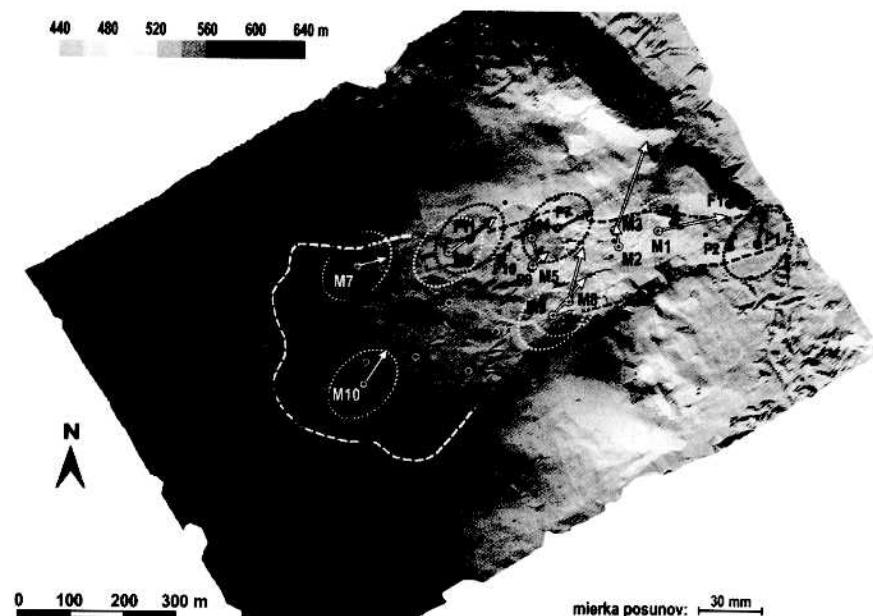
<sup>1</sup> zohľadnené sú aj maximálne hodnoty diferencií; hodnoty použité pri grafickom znázornení formou konfidenčných elips sú zvýraznené tučným písmom

### Polohové zmeny monitorovacích bodov ako indikátor aktivity zosuvu

Periodické zameriavanie OB od apríla 2007 do apríla 2009 nám umožňuje kvantifikovať veľkosť ich polohových zmien s pomerne vysokou presnosťou a analyzovať tak recentnú dynamiku topografických zmien na zosuve. Obr. 4 a 5 ilustrujú kumulatívne zmeny polohy OB (vektory posunov) za celé sledované obdobie. Na základe nami stanovených konfidenčných intervalov s 99 % pravdepodobnosťou hodnotíme ako signifikantné zmeny na bodoch T1, T4, T12, T13, T19, T24 a M1, M3, M6, M8, M9. Kumulatívne posuny na bodoch „T“ dosahujú hodnoty 21-35 mm za sledované obdobie, čo indikuje rýchlosť pohybov 10,5-17,5 mm za rok. Kumulatívne hodnoty posunov na bodoch „M“ v rozpäti 27-45 mm za sledované obdobie (v tomto prípade 18 mesiacov od prvého zamerania) predstavujú priemerné medziročné posuny od 18 do 30 mm. Hodnoty kumulatívnych posunov na bodoch „P“ a „F“ sú v priemere najmenšie, 5 až 19 mm. Ani jeden bod teda neprekročil nami stanovenú 99 % limitnú hodnotu, dva body (P7 a P15) túto hodnotu dosahujú. Body P1, P11, P25 a F4 dosahujú, resp. o niečo prekračujú hodnotu 95 % konfidenčného intervalu. Hodnoty 5-19 mm zároveň predstavujú jednorocné hodnoty posunov, keďže tieto body boli zameriavané až od apríla 2008.

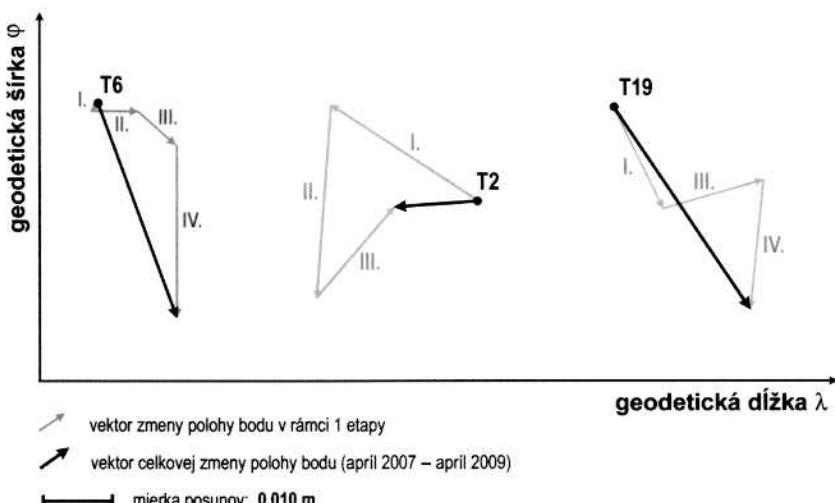


Obr. 4. Polohové (2D) posuny monitorovacích bodov „T“ vynesené na digitálnom modeli reliéfu. Chybové elipsy sú zostrojené na základe stanovených hodnôt konfidenčných intervalov z tab. 2



Obr. 5. Polohové (2D) posuny monitorovacích bodov „P“ a „M“

Hodnotenie pohybov monitorovacích bodov metódou kumulatívnych pohybov môže byť užitočné a efektívne v prípade, že hodnoty polohových zmien v rámci jednotlivých etáp sú relatívne malé, nedosahujú stanovené limitné hodnoty, a preto je tăžké ich hodnotiť. Ak však hodnota polohovej zmeny v určitom smere postupne narastá (pohyb bodu vykazuje určitý trend), prejaví sa to akumulovaním hodnoty posunu (obr. 6). V prípade, že je smer pohybu monitorovacích bodov blízky generálnemu smeru zosúvania svahu, zvyšuje to relevantiu získaných dát.



Obr. 6. Kumulatívne a postupné polohové zmeny vybraných monitorovacích bodov

Ak sú však medzietapové diferencie malé (v zmysle nami stanovených limitov) a navyše vykazujú rôzny smer, často opačný, možno ich zväčša považovať za chyby v určení polohy. Potom sú aj výsledné kumulatívne hodnoty posunov malé. Pri interpretácii takýchto pohybov je však nevyhnutná opatrnosť. Do úvahy je potrebné brať aj iné faktory, najmä atribúty stanovišťa bodu. Metóda kumulatívnych posunov môže viesť v niektorých prípadoch k podcenению inak signifikantných pohybov rôzneho (často protichodného) smeru (napr. pohyb bodu T2 na obr. 6). Posuny takéhoto charakteru sme naznamenali napríklad pri OB lokalizovaných na terénnych eleváciách, ktoré sú s veľkou pravdepodobnosťou morfologickými prejavmi existencie väčších rigidných blokov v zosuvnom svahovom sedimente. Zistené „protichodné“ pohyby nemusia v takomto prípade indikovať chybne určenie polohy bodu. Správanie sa rigidných blokov je zväčša do značnej miery nezávislé a nemusí byť zhodné s generálnym smerom (resp. smermi) pohybu svahových hmôt. Rigidný blok sa môže nakláňať alebo mierne rotovať v mäkšom, nekonsolidovanom svahovom sedimente, čo je bežný prejav kinematických pohybov na nestabilných svahoch (Nemčok 1982).

Porovnaním našich výsledkov s výsledkami geodetického monitoringu vykonávaného v rámci projektu „Čiastkový monitorovací systém – Geologické

faktory“ v rokoch 1988-2006 (SGÚDŠ 2009) možno konštatovať, že na území zosuvu pokračuje tendencia spomalovania povrchových prejavov pohybovej aktivity, ktorá je zrejmá približne od roku 2001. V rámci našich hodnotení výraznejšie hodnoty posunov vykazujú len body „M“, stabilizované v najplytšej úrovni.

**Tab. 3. Hodnoty kumulatívnych polohových (xy) posunov vybraných monitorovacích bodov (v metroch); čísla 1-5 vyjadrujú poradie meracej kampane**

| Body | xy5-xy1/ $\Delta t^1$ | Body | xy5-xy2/ $\Delta t$ | Body  | xy5-xy3/ $\Delta t$ |
|------|-----------------------|------|---------------------|-------|---------------------|
| T1   | 0,031                 | /18  | M1                  | 0,033 | /18                 |
| T4   | 0,022                 | /24  | M2                  | 0,011 | /18                 |
| T6   | 0,031                 | /24  | M3                  | 0,045 | /18                 |
| T12  | 0,023                 | /24  | M6                  | 0,028 | /18                 |
| T13  | 0,020                 | /24  | M8                  | 0,026 | /18                 |
| T18  | 0,019                 | /24  | M9                  | 0,027 | /18                 |
| T19  | 0,035                 | /24  | M10                 | 0,020 | /18                 |
| T21  | 0,026                 | /24  |                     |       |                     |
| T24  | 0,028                 | /24  |                     |       |                     |

<sup>1</sup> časová differencia – počet mesiacov medzi prvým a posledným zameraním

Na základe nami získaných hodnôt kumulatívnych polohových zmien možno na území zosuvu vyčleniť niekoľko zón s indikovanými prejavmi pohybovej aktivity (obr. 5 a 6). Považujeme za potrebné upozorniť na to, že merania sme uskutočňovali v tých častiach zosuvu, ktoré umožňujú kvalitný príjem signálu. Exaktné hodnotenie prejavov povrchovej aktivity v tých častiach zosuvu, ktoré sú pokryté hustou lesnou vegetáciou (vrátane krovín) nie je touto metódou možné.

#### Povrchové posuny verus zrážky

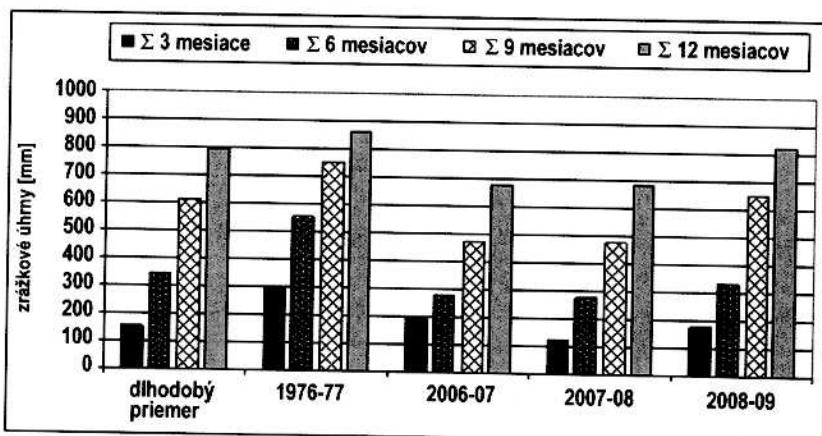
Relativne malé hodnoty medziročných posunov môžu byť klasifikované aj ako prejav stabilizácie svahu, predtým je však nutné zhodnotiť amplitúdy polohových zmien monitorovacích bodov z hľadiska veľkosti zrážkových úhrnov počas sledovaného obdobia. Anomálne zrážkové úhrny sú všeobecne považované za jeden z hlavných spúšťacích faktorov zosuvov (napr. Crozier 1999, Ronchetti et al. 2009 a van Asch et al. 2009), a najmä reaktivácie už existujúcich (Nemčok 1982). Na druhej strane možno predpokladať, že nízke zrážkové úhrny budú mať opačný vplyv, teda povedú k stabilizácii svahu. Napriek tomu, že táto problematika hodnotenia vzťahu medzi zrážkami a vznikom (reaktiváciou) zosuvov je veľmi komplexná a vyžaduje si hlbšiu analýzu, pokúsime sa na základe údajov zo zrážkomernej stanice Lubietová aspoň o všeobecné zhodnotenie nami sledovaného obdobia z hľadiska zrážkových úhrnov a jeho porovnanie s obdobím, ktoré predchádzalo reaktivizácii zosuvu v roku 1977. Zrážkové anomálie sa ako významný spúšťiaci faktor zosuvov (najmä tých hlbšie založe-

ných) prejavujú najmä v obdobiach s relatívne nízkymi priemernými dennými teplotami. V podmienkach Slovenska teda ide najmä o neskoré jesenné až skoré jarné mesiace. Aj k reaktivizácii nami skúmaného zosuvu došlo na konci februára. Ak zhodnotíme sumárne zrážkové úhrny za obdobie 3, 6, 9 a 12 mesiacov, počítané vždy ku koncu mesiaca február (tab. 4, obr. 7), zistíme, že najmä hodnoty 3-mesačných (december-február) a 6-mesačných (september-február) sumárnych úhrnov z rokov 1976-1977 vysoko prekračujú dlhodobé priemery (za roky 1931-1977), kým pri hodnotách 9- a 12-mesačných úhrnov už tento trend nie je taký výrazný. Aj z toho možno urobiť predbežný záver, že práve „chladné“ mesiace roka sú pri hodnotení vplyvu zrážok na prejavy pohybovej aktivity ľubietovského zosuvu klúčové. Sumárne zrážkové úhrny sú zároveň určitým indikátorom celkového nasýtenia svahu vodou, čo je tiež významný faktor pri aktivizácii zosuvov (napr. Wieczorek 1987, Corominas a Moya 1999 a Corominas 2001). Inak povedané, jeden zrážkovo nadpriemerný mesiac po 4 suchých mesiacoch bude mať pravdepodobne len minimálny vplyv na zvýšenie aktivity zosuvného svahu. V sledovanom období sumárne hodnoty 3- a 6-mesačných úhrnov zrážok dosahovali skôr podpriemerné, prípadne priemerné hodnoty (tab. 4, obr. 7). Zvlášť zimné obdobie 2007-2008 možno hodnotiť ako výrazne podpriemerné z hľadiska množstva dažďových (ale aj snehových) zrážok. Súčasná nižšia aktivita zosuvu tak môže byť len prirodzeným dôsledkom podpriemerných zrážkových úhrnov v zimných obdobiach sledovaných rokov. Naopak, nadpriemerné zrážky v niektorých mesiacoch (aj v letnom období) sa mohli podieľať (popri iných faktoroch) na výraznejších polohových zmenách plynko stabilizovaných bodov „M“.

**Tab. 4. Sumárne zrážkové úhrny ku koncu mesiaca február daného roku**

| Sumárne zrážkové úhrny             | $\sum 3\text{ M}$ | $\sum 6\text{ M}$ | $\sum 9\text{ M}$ | $\sum 12\text{ M}$ |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Dlhodobý priemer <sup>1</sup> (mm) | 152,0             | 343,0             | 615,0             | 797,0              |
| 1976/1977 (mm)                     | 296,0             | 550,0             | 753,0             | 864,0              |
| % dlhodobého priemeru              | 195 %             | 160 %             | 122 %             | 108 %              |
| 2006/2007 (mm)                     | 192,4             | 275,0             | 470,5             | 678,3              |
| % dlhodobého priemeru              | 126 %             | 80 %              | 77 %              | 85 %               |
| 2007/2008 (mm)                     | 120,9             | 274,6             | 474,1             | 683,3              |
| % dlhodobého priemeru              | 80 %              | 80 %              | 77 %              | 86 %               |
| 2008/2009 (mm)                     | 178,8             | 333,0             | 649,9             | 825,8              |
| % dlhodobého priemeru              | 117 %             | 97 %              | 105 %             | 104 %              |

<sup>1</sup> priemerná hodnota za roky 1931-1977



Obr. 7. Sumárne zrážkové úhrny ku koncu mesiaca február daného roku

## ZÁVER

Periodickým zameriavaním monitorovacích bodov na zosuve v Lúbietovej od apríla 2007 do apríla 2009 metódami GPS sme získali hodnoty zmien ich polohových súradníc, ktoré nám umožnili kvantifikovať veľkosť medzietapových, medziročných a kumulatívnych (24-, 18- a 12-mesačných) posunov monitorovacích bodov. Získali sme tak aktuálne údaje, na základe ktorých sme analyzovali súčasný stav zosuvu z hľadiska prejavov povrchovej pohybovej aktivity. V sledovanom období sme zaznamenali relatívne malé medziročné polohové zmeny monitorovacích bodov (5-19 mm za rok pre hlbšie stabilizované body T, P a F a 18-30 mm pre plynko stabilizované body M). Táto skutočnosť môže po ukazovať na stabilizáciu zosuvu (účinkom rýchlo postupujúcej sukcesie, čiasťou funkciou stabilizačných opatrení vybudovaných v roku 1977), no pravdepodobne aj vďaka podpriemerným zrážkovým úhrnom v chladných mesiacoch sledovaného obdobia. Aby sme získali ďalšie dátá, ktoré potvrdia resp. vyvrátia nás predpoklad, je nevyhnutné pokračovať s monitorovaním geodetickej siete v nasledujúcom období minimálne jedenkrát ročne (ideálne dvakrát ročne) použitím zvolenej geodetickej metodiky.

Naše výsledky potvrdili, že pri dodržaní metodických zásad a akceptovaní osobitostí zvolenej metodiky je možné zmeny polohových súradníc monitorovať s dosťatočne vysokou presnosťou, porovnatelno s klasickými geodetickými metódami. Pri zriadení a zameraní vlastných referenčných bodov v blízkosti monitorovaného územia je efektívne využitie v súčasnosti cenovo dostupných jednofrekvenčných geodetickej GPS prístrojov, ktoré pri zameriavaní relatívne krátkych vektorov (základníc) poskytujú presné výsledky. Väčšie diferencie pri kontrolných meraniach boli zistené len v určení výšky, čo je zistený nedostatok GPS meraní (Sedlák et al. 2007). Výškové diferencie v rozpätí 31-45 mm, zaznamenané kontrolnou sésiou počas jednej z meracích kampaní naznačujú, že pri určitej súhre nepriaznivých podmienok môže byť určenie výšky monitorovacích bodov menej presné. Aj naše merania potvrdzujú, že väčšie chyby v určení

výšky sa nemusia nevyhnutne prejaviť v znižení presnosti určenia polohy týchto bodov.

*Príspevok vznikol vďaka finančnej podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci riešenia projektov VEGA 1/4052/07 a 1/0157/10. Autori ďakujú Ing. Jozefovi Ornethovi za uvedenie do problematiky geodetických GPS meraní, za pomoc pri zameraní a určení súradníc referenčných bodov a pri spracovaní GPS dát a obci Lubietová za finančnú pomoc pri vybudovaní referenčných bodov. Študentom FPV UMB v Banskej Bystrici ďakujeme za pomoc pri terénnych meraniach.*

## LITERATÚRA

- COE, J. A., WELLIS, W. L., GODT, J. W., SAVAGE, J. E., MICHAEL, J. A., KIBLER, J. D., POWERS, P. S., LIDKE, D. J., DEBRAY, S. (2003). Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998–March 2002. *Engineering Geology*, 68, 61-101.
- COROMINAS, J. (2001). Landslide and climate. In Bromhead, E. N., ed. *Keynote Lectures Delivered at the 8<sup>th</sup> International Symposium on Landslides. Thomas Telford Cardiff, June 2000*. pp. 1-33.
- COROMINAS, J., MOYA, J. (1999). Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30, 79-93.
- CROZIER, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surf Processes and Landforms*, 24, 825-833.
- CRUDEN, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- FUSSGÄNGER, E., JADROŇ, D., BANSKÝ, M., TYLEČEK, B. (1978). Lubietová – prúdový zosun. Záverečná správa z predbežného inžinierskogeologického prieskumu zosunu, Inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum, Žilina.
- GILI, J. A., COROMINAS, J., RIUS, J. (2000). Using global positioning system techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 167-192.
- HANKOVSKÝ, J. (2000). Transformácie GPS meraní a posttransformačné úpravy súradníc. *Acta Montanistica Slovaca*, 5, 83-90.
- HÓK J., BIELIK, M., VANKO, J., KOVÁČ, P., ŠUJAN, M. (2000). Neotektonický charakter územia Slovenska. *Mineralia Slovaca*, 32, 459-470.
- JELÍNEK, R. (2005). Deterministický prístup pri hodnotení hazardu Ľubietovského zosunu. *Mineralia Slovaca*, 37, 65-74.
- LOSERT, J. (1960). *Geologie a metalogenese západnej časti Ľubietovské zóny a prilehlého subtatrika*. Kandidátska dizertačná práca, Přírodovědecká fakulta UK, Praha.
- MAGELLAN (2009). *ProMark3 technical specifications*. Dostupné na: <http://www.promagellangps.com/en/products/localization/PM3DS.asp> (cit: 2010-6-2).
- MAGLAY, J., HALOZKA, R., BAŇACKÝ, V., PRISTAŠ, J., JANOČKO, J. (2002). *Atlas krajiny SR. Neotektonická stavba*. Bratislava (MŽP SR), Banská Štiavnica (Esprit).

- MALGOT, J. (1969). *Vývoj zosuvných území na okrajoch vulkanických pohorí*. Kandidátska dizertačná práca, Stavebná fakulta STU, Bratislava.
- MALGOT, J., BALIAK, F. (2002). Influence of human activity on the development of landslides in Slovakia. *Geografický časopis*, 54, 21-38.
- MALET, J. P., MAQUAIRE, O., CALAIS, E. (2002). The use of global positioning system techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the super-sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43, 33-54.
- MAZÚR, E., LUKNIŠ, M. (1986). *Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. Časť Slovensko*. Bratislava (Slovenská kartografia).
- MAZÚR, E., ČINČURA, J., KVITKOVIČ, J. (1980). *Atlas SSR. Geomorfológia*. Bratislava (SAV, SÚGK).
- MEDVEĐOVÁ, A., MINÁR, J., PROKEŠOVÁ, R. (2008). Dynamicky orientovaný hierarchický GmIS (prípadová štúdia Ľubietová). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 8, 42-54.
- MINÁR, J., BIELIK, M., KOVÁČ, M., PLAŠIENKA, D., BARKA, I., STANKOVIANSKY, M., ZEYEN, H. (2010). New morphostructural subdivision of the Western Carpathians: an approach integrating geodynamics into targeted morphometric analysis. *Tectonophysics*. Dostupné na: 10.1016/j.tecto. (cit: 2010-04-03), v tlači.
- NEMČOK, A. (1982). *Zosuvy v Slovenských Karpatoch*. Bratislava (Veda).
- NEWMANN, A., STEIN, S., WEBER, J., ENGELN, J., MAO, A., DIXON, T. (1999). Slow deformation and lower seismic hazard at the new Madrid seismic zone. *Science*, 284, 619-621.
- PELER, Y., KAHLE, H. G., COCARD, M., VEIS, G., FELEKIS, S., PARADISSIS, D. (1998). Establishment and continuous GPS network across the kephalonian fault zone, Ionian Islands, Greece. *Tectonophysics*, 294, 253-260.
- POLÁK, M., FILO, I., HAVRILA, M., BEZÁK, V., KOHÚT, M., KOVÁČ, P., VOZÁR, J., MELLO, J., MAGLÁY, J., ELEČKO, M., OLŠAVSKÝ, M., PRISTAŠ, J., SIMAN, P., BUČEK, S., HÓK, J., RAKÚS, M., LEXA, J., ŠIMON, L. (2003). *Geologická mapa Starohorských vrchov, Čiertaže a severnej časti Zvolenskej kotliny, 1:50 000*. Bratislava (ŠGÚDŠ).
- PROKEŠOVÁ, R., KARDOŠ, M., MEDVEĐOVÁ, A. (2010). Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs: a case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology*, 15, 90-101.
- RONCHETTI, F., BORGATTI, I., CERVI, F., GORGONI, C., PICCININI, L., VINCENZI, V., CORSINI, A. (2009). Groundwater processes in a complex landslide, northern Apennines, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 895-904.
- SJOBERG, L. E., PAN, M., ASENJO, E., ERLINGSSON, S. (2000). Glacial rebound near Vatnajokull, Iceland, studied by GPS campaigns in 92-96. *Journal of Geodynamics*, 29, 63-70.
- SEDLÁK, V., NEMCOVÁ, G., ŠIMČÁK, M. (2007). Testovanie presnosti kinematických GPS meraní. *Acta Montanistica Slovaca*, 12, 533-539.
- SOKKIA (2009). *Stratus Operations Manual*. Dostupné na: [http://www.sokkiagps.com/support/s\\_stratus.php](http://www.sokkiagps.com/support/s_stratus.php) (cit: 2009-11-30).
- SQUARZONI, C., DELACOURTE, C., ALLEMAND, P. (2005). Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Engineering Geology*, 79, 215-229.

- ŠGÚDŠ (2009). Zosuvy a iné svahové deformácie. Dostupné na: [http://dionysos.gssr.sk/cmsgf/select/db\\_select\\_zosuvanie\\_2.php?lokalita=%BCubietov%E1&metoda2=zos\\_geodezia](http://dionysos.gssr.sk/cmsgf/select/db_select_zosuvanie_2.php?lokalita=%BCubietov%E1&metoda2=zos_geodezia) (cit: 2009-11-12).
- ŠÜTTI, J., WEISS, G. (1996). Trojrozmerné geodetické sledovanie svahových deformácií. *Acta Montanistica Slovaca*, 1, 109-116.
- TALICH, M. (2007). Analýza deformací v poddolovaných lokalitách z opakovanych polohových měření s využitím webové aplikace a mapových služeb WMS. *Acta Montanistica Slovaca*, 12, 567-575.
- TALICH, M., HAVRLANT, J. (2008). Application of deformation analysis and its new possibilities. In *Measuring the changes – joint symposia of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, May, 12.-15. 2008. Lisbon (LNEC)*.
- URBÁNEK, J. (2009). *Geomorfologická katéna (časopriestorové štruktúry)*. Bratislava (Veda).
- VAN ASCH, TH. W. J., MALET, J.-P., BOGAARD, T. A. (2009). The effect of groundwater fluctuation on the velocity pattern of the slow-moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 739-749.
- VUGTK (2009). Analyza deformací. Dostupné na: [www.vugtk.cz/~deformace](http://www.vugtk.cz/~deformace) (cit: 2009-11-23-25).
- WENDT, J., DIETRICH, R. (2002). Determination of recent crustal deformations based on precise GPS measurements in the Vogtland earthquake area. *Journal of Geodynamics*, 35, 235-246.
- WIECZOREK, G. F. (1987). Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 93-104.

*Roberta Prokešová, Alžbeta Medvedová*

## **GPS MONITORING AS A TOOL FOR ASSESSMENT OF RECENT LANDSLIDE DYNAMICS**

Recently, Global Positioning System (GPS) surveying techniques have been increasingly employed to monitor various types of surface deformations including landslide movements. This paper reports the results of the Global Positioning System survey that has been used to measure landslide surface displacements.

We analyse surface displacements from five GPS campaigns carried out from April 2007 to April 2009 in a network of 42 points in the Lúbietaová landslide. GPS data were acquired with four geodetic single-frequency receivers (Stratus – Sokkia and ProMark-3 – Magellan) and processed with Ashtech Solution v.2.6 and Spectrum Survey v.3.10. During each campaign one GPS receiver was placed on the reference point (Base-1) for the whole time of observation and three receivers were placed on monitored points for 0.5-1-hour sessions.

The real accuracy of the obtained adjusted coordinates was evaluated by two methods. Some of the monitoring points were repeatedly measured during one GPS campaign. Then, the coordinate differences were statistically evaluated. In the second method the coordinate differences obtained by measuring of reference points (RB-2 and RB-3) during individual GPS campaigns were assessed with the assumption that the

reference points were stable. The real accuracy for horizontal coordinate differences was 0.016 m for  $\Delta x$  and  $\Delta y$  and 0.019 m for  $\Delta xy$ . The values obtained for vertical ( $\Delta z$ ) differences were slightly worse mainly due to uncertainties of the GPS measurements of the z-component.

The results reveal cumulative displacements of up to 35-45 mm depending on stabilization depth of points. These values suggest that the annual rates of displacements are up to 17.5 mm for more stabilized "T" points and up to 30 mm for the shallow "M" points. Although the amplitudes of displacements are not so high as in previous monitoring periods they delineate several active areas in the landslide body. Relatively small displacements could be explained by slope stabilization due to spread of shrub and tree vegetation, partly functional remedial measures and a relatively small amount of cumulative rainfall in winters during the assessed time period. Because the latter is the most probable reason, further monitoring of the slope is necessary.