

# DIGITÁLNA LETECKÁ FOTOGRAMETRIA AKO NÁSTROJ PRE DLHODOBÝ MONITORING ZOSUVNÉHO ÚZEMIA: VÝVOJ LUBIETOVSKÉHO ZOSUVU V ROKOCH 1969 – 1998

ROBERTA PROKEŠOVÁ\*, MIROSLAV KARDOSĎ\*\*, ALŽBETA MEDVEĎOVÁ\*\*\*

**Roberta Prokešová, Miroslav Kardoš, Alžbeta Medveďová: Digital aerial photogrammetry as a tool for long-term landslide monitoring: evolution of the Lubietová landslide from 1969 to 1998. Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 8, 2008, 1, 6 figs., 5 tabs., 27 refs.**

Quantitative analysis of the evolution of the Lubietová landslide (central Slovakia) from 1969 to 1998 was carried out using a sequence of historical aerial photographs taken in 1969 (1:16 000), 1977 (1:17 000), 1988 (1:17 000) and 1998 (1:20 000). All images acquired by means of the analogue photogrammetric aerial cameras were converted into a digital format using high quality photogrammetric scanner. The photograph negatives were scanned with resolution 14  $\mu\text{m}$  that corresponds to a ground resolution of approximately 20 to 30 cm. The elevation changes of the landslide area were calculated and visualized by subtracting DTMs two by two (the earlier DTM from the later one) to create three basic differential DTMs (i.e. "1998 – 1988", "1988 – 1977" and "1977 – 1969") each of them represents the "surface of change" between two subsequent time periods. To achieve the most reliable results, quality of extracted data (i.e. stereomodels as well as DTMs) was evaluated using of the check point's statistics. As expected, data quality is strictly related to all: image mean scale and relative flying height, image resolution, distribution of ground control points and terrain characteristics. It was recognized that vertical changes belonging to the 1998 – 1988 epoch were rather low in relation to the accuracy of elevation data that could be achieved in these two DTMs. The most significant vertical changes were expected in the "1977 – 1969 differential DTM", because it reflects epoch when a large ground masses have been displaced (i.e. catastrophic landslide event in the spring of 1977). It may be concluded that our method is very useful for quantification of elevation changes in a landslide area namely if they are more than 1 m in range.

**Key words:** Archival aerial photographs; digital photogrammetry; DTM; landslides; vertical displacements

## 1 ÚVOD

Svahové procesy patria k závažným geohazardom spôsobujúcim každoročne mnoho materiálnych škôd a neraz aj obeť na životoch. Štúdium ich vzniku a vývoja preto logicky patrí do centra pozornosti geovedcov. Svahové procesy sú však fenoménom natoľko variabilným, nepredvídateľným a na ich vývoj vplýva také množstvo vstupujúcich premenných (faktorov), že aj napriek už pomerne veľkému množstvu známych údajov, stále je do tejto platformy čím prispieť. Každá nová informácia o vývoji toho-ktorého zosuvného územia môže byť cenným prínosom k hlbšiemu poznaniu zákonitostí tohto prírodného javu. S vysokou variabilitou samotného procesu ako aj faktorov, ktoré ho ovplyvňujú, súvisí aj veľké množstvo rôznych prístupov k jeho štúdiu. To v konečnom dôsledku umožňuje pozrieť sa na jav z rôznych uhlov a syntetizujúcim prístupom dôjsť k ucelenejšiemu pohľadu na tento fenomén.

K pochopeniu fungovania zosuvných mechanizmov významne prispievajú informácie o horizontálnych a vertikálnych pohyboch, teda zmenách georeliéfu v zosuvnom území. Veľmi presné informácie (s centimetrovou až subcentimetrovou presnosťou) o pohyboch na zosuve je možné získať použitím klasických alebo moderných (GPS) geodetických metód. Tieto informácie sa však viažu výhradne k vybranému bodovému poľu monitorovacej siete. Geodetické metódy monitoringu svahových pohybov sa stávajú časovo a finančne príliš náročnými, ak chceme výrazne zvýšiť hustotu sledovaného bodového poľa alebo skrátiť intervaly medzi jednotlivými meracími kampaňami. Navyše sme pomocou geodetických metód schopní zachytiť len pomerne krátky časový úsek vývoja zosuvného svahu (zväčša v horizonte 3 – 5 rokov) a nezískame teda informácie o dlhodobej kinematike územia.

Komplexnejší trojrozmerný pohľad na študované územie je možné získať metódami diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). K dispozi-

\* Ústav Vedy a výskumu Univerzity Mateja Bela, Cesta na Amfiteáter 1, Banská Bystrica; e-mail: roberta.prokesova@umb.sk

\*\* Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická Univerzita Zvolen, T. G. Masaryka, Zvolen; e-mail: kardos@vsld.tuzvo.sk

\*\*\*Katedra geografie a krajinej ekológie, Fakulta prírodných vied Univerzity Mateja Bela, Tajovského 40, Banská Bystrica; e-mail: medvedov@fpv.umb.sk

cii je viacero metód, umožňujúcich extrakciu dát rôznej kvality, mierky a presnosti (prehľad napr. v práci METTERNICHT et al. 2005). Avšak len jedna z nich, letecká fotogrametria, je schopná poskytnúť informácie o vývoji územia v relatívne dlhodobom časovom horizonte (30 – 50 rokov). Archívne letecké meračské snímky (LMS) vyhovujúcej kvality sú k dispozícii vo väčšine európskych krajín, vrátane Slovenska, už z obdobia 50 - tych, resp. 60 - tych rokov 20. storočia.

Príspevok prezentuje prvé výsledky, získané spracovaním archívnych LMS metódami digitálnej leteckej fotogrametrie za obdobie rokov 1969 – 1998.

## 2 MODELOVÉ ÚZEMIE

Za modelovú lokalitu sme si zvolili územie „katastrofálneho“ Ľubietovského zosuvu, ktorý sa aktivoval na prelome februára a marca v roku 1977 na severozápadnom okraji obce Ľubietová po predchádzajúcom období intenzívnych zrážok. Územie sa nachádza na severovýchodnom okraji neogénneho stratovulkánu Poľana (**obr. 1**).

jenia hlavného prúdu s bočnými je približne 500 m, v čelnej časti sa zosuv zužuje na cca 100 m. Podložie zosuvných mäs tvoria terciérne flyšoidné komplexy s výrazným zastúpením ílovcov. Zosuv je obklopený blokmi neogénnych aglomerátových tufov, ktoré sa nachádzajú aj vo vrchnej časti svahu, nad odľučnou hranou. Nízka stabilita svahu, daná geologickou stavbou podložia, je prirodzene narúšaná pomalými pohybmi aglomerátových blokov (rotácia blokov a zatlačanie do podložia) a výraznými zrážkovými eventmi. V čase aktivizácie zosuv spôsobil značné materiálne škody (zničenie niekoľkých obytných domov), pričom hrozilo prehradenie toku Hutnej. Celkový horizontálny pohyb zosuvných mäs, zistený geodetickými meraniami, bol cca 9 m v odľučnej oblasti, 3 – 6 m v čelnej časti a až vyše 49 m v transportačnej zóne zosuvu. Objem zosuvných mäs bol odhadnutý na 4,1 miliónov m<sup>3</sup> (FUSSGÄNGER et al. 1978, NEMČOK 1982).

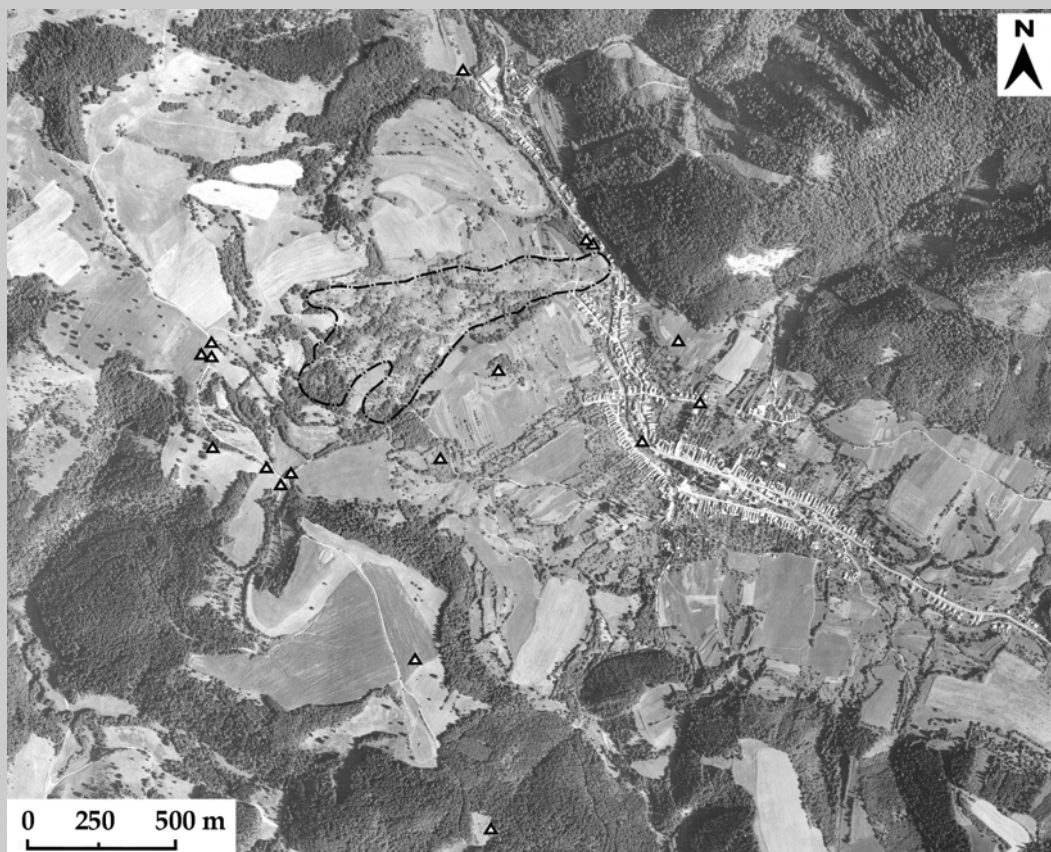
Lokalita predstavuje veľmi vhodné modelové územie. Vďaka intenzívnemu prieskumu územia po zosuvnej udalosti (FUSSGÄNGER et al. 1978) bolo získaných mnoho základných poznatkov o jej geologickej stavbe (vrátane ú-



**Obr.1** Lokalizácia modelového územia

Zosuv „Za Výselníkom“ je situovaný na ľavom brehu toku Hutná severne od kóty Šibenica v území, ktoré je celé charakteristické rozvojom svahových porúch. Jedná sa prúdový zosuv, vo vrchnej časti rozčlenený na tri samostatné laloky (**obr. 2**). Dĺžka hlavného, stredného, prúdu pri výškovom rozdieli cca 160 m presahuje 1200 m. Šírka zosuvu v mieste spo-

dajov z vrtného prieskumu). Následné vybudovanie siete monitorovacích a sanačných zariadení (horizontálne odvodňovacie vrty, piezometrické vrty a sieť bodov pre geodetické monitorovanie pohybov) umožňuje sledovanie hydrogeologického režimu územia a monitorovanie jeho pohybovej aktivity. V blízkosti zosuvného svahu (len niekoľko 100 m) sa nachá-



**Obr. 2** Ortofotosnímka modelového územia z roku 1998 s vyznačenou hranicou katastrofálneho zosuvu (čiarkovaná línia) a schémou lokalizácie vlicovacích bodov (trojuholníky)

dza zrážkomerná stanica SHMÚ, takže je zároveň možné získané dáta (režimné aj geodetické) vzťahovať k presným údajom o nameraných zrážkach. Pravidelné premeriavanie (v dvojročných intervaloch) geodetickej monitorovacej siete od roku 1988 zároveň poskytuje presné dáta pre kontrolu produktov derivovaných metódou digitálnej leteckej fotogrametrie.

### 3 VYUŽITIE DIGITÁLNEJ LETECKEJ FOTOGRAMETRIE PRI ŠTÚDIU SVAHOVÝCH PROCESOV

Letecké meračské snímky (LMS) sa už viac ako desaťročie úspešne uplatňujú vo výskume krajinných procesov na Slovensku, napríklad pri hodnotení vplyvu kolektivizácie na priebeh denudačných procesov a erózie (STANKOVIANSKY 1994, 2001), časovom hodnotení výmolinej erózie v rokoch 1949 – 1994 na vybraných lokalitách Západných Karpát (ONDRAŠÍK 2002). Časté uplatnenie nachádzajú LMS v súčasnej fluvialnej geomorfológii (napr. PIŠŤ 1994, 2000; GREŠKOVA

2002, 2003). Možnostiam využitia fotogrametrických metód pri vyhodnocovaní morfydynamiky však zatiaľ nebola na Slovensku venovaná dostatočná pozornosť.

Špeciálne pri štúdiu zosuvov prináša využitie LMS viaceré výhody. Vďaka stereoskopickému prekrytiu poskytujú trojrozmerný pohľad na študované územie, čím umožňujú vizuálne podchytiť a interpretovať vzájomné vzťahy medzi morfológickými elementmi omnoho zreteľnejšie a jednoznačnejšie než pri priamej obhliadke terénu. Je tak možné lepšie vymedziť hranice postihnutých území, efektívnejšie vytýčiť profilové línie, či rozmiestniť bodové monitorovacie zariadenia. Popri možnostiach, ktoré poskytuje samotná fotointerpretácia LS, v ostatných rokoch sa vďaka pokroku v oblasti informačných technológií ako veľká výhoda ukazuje možnosť relatívne rýchlej a efektívnej extrakcie kvantitatívnych dát zo zvislých leteckých meračských snímok (LMS).

Získanie spoľahlivých kvantitatívnych údajov z LMS si vyžaduje elimináciu geometrického skreslenia snímok, ktoré sa realizuje procesom diferenciálneho prekresľovania. Napriek

tomu, že tieto metódy sú známe viac než storočie (prehľad možno nájsť v práci BALTSAS-VIAS 1996), k ich intenzívnejšiemu využívaniu sa pristúpilo až v etape rozvoja analytických fotogrametrických metód v 60-tych až 80-tych rokoch 20. storočia. Analytické metódy však boli a dodnes zostávajú pomerne pracnou a nákladnou metódou, ktorá si navyše vyžaduje značné skúsenosti. Naopak, neustále sa rozvíjajúce a zdokonaľujúce automatizované digitálne techniky už dnes umožňujú pomerne rýchlu extrakciu dát s relatívne vysokým rozlíšením a presnosťou a pokrok v tejto oblasti bude určite ďalej rýchlo napredovať. Užívateľsky čoraz prijateľnejšie prostredie vyvíjaných softvérov zvyšuje dostupnosť nástrojov digitálnej fotogrametrie pre stále širší okruh bádateľov, študujúcich procesy zemského povrchu. Produkty digitálnych fotogrametrických techník, ako sú digitálne výškové modely (DVM) alebo ortofotosnímky, sa ďalej využívajú ako cenný zdroj dát pre modelovanie stability zosuvov alebo všeobecne kvantifikáciu zmien reliéfu. Nesporne jednou z najväčších výhod, akú táto metodika prináša, je možnosť spätného štúdia zmien georeliéfu záujmového územia v uplynulých desaťročiach, čo umožňuje kvantifikovať procesy v danej oblasti aj s istým časovým odstupom, resp. vizualizovať dynamiku územia v dlhšom časovom úseku (niekoľko desaťročí).

Jedným z produktov, ktorý je možné získať digitálnym spracovaním LMS je digitálny výškový model (DVM). Jedná sa o numerický model zemského povrchu predstavujúci množinu priestorovo priradených údajov o nadmorskej výške reliéfu, vypočítaných na základe vstupných údajov a vhodnej interpolačnej metódy. V prípade, že vstupnými dátami sú údaje o výške terénnych bodov, hovoríme o digitálnom modeli terénu (DMT). Ak model obsahuje

aj údaje o výške objektov na zemskom povrchu (napr. budovy, stromy) DVM je vlastne digitálnym modelom povrchu (DSM – digital surface model). DMT sa ako nástroj na štúdium deformácií zemského povrchu osvedčil, čo dokumentuje aj jeho využitie pri štúdiu rôznych fenoménov a procesov od monitoringu deformácií vulkanických štruktúr (napr. FABRIS, PESCI 2005), cez pohyb a vývoj ľadovcov (KAUFMANN, LADSTÄDTER 2002) až po gravitačné deformácie a zosuvy (napr. GENTILI et al. 2002, VAN WESTEN, GETAHUN 2003, WALSTRA et al. 2004, CASSON et al. 2005, DEWITTE et al. 2008). Všetky uvedené procesy možno identifikovať, kvantifikovať a hodnotiť porovnaním DMT z rôznych časových období.

## 4 METODIKA A VÝSLEDKY

### 4.1 VÝBER SNÍMOK

Pre potreby riešenia projektu boli z Topografického ústavu Armády SR v Banskej Bystrici zapožičané 4 sady archívnych LMS z rokov 1969, 1977, 1988 a 1998. Medzi jednotlivými snímkami je tak cca 10-ročný odstup, čo umožňuje relevantné porovnávanie procesov v jednotlivých časových úsekoch. Všetky snímky (negatívy) sú čiernobiele a boli zhotovené analógovými fotogrametrickými kamerami. Ich základné charakteristiky a parametre sú uvedené v **tab. 1**. Do podoby digitálneho formátu TIFF s rozlíšením 1800 DPI boli snímky konvertované pomocou špeciálneho fotogrametrického skenera LEICA-HELA-VA DSW 200. Geometrické rozlíšenie digitálnych snímok zodpovedalo veľkosti obrazového elementu 14  $\mu$ , čo v skutočnosti predstavovalo 0,20 – 0,30 m (xy) a 0,40 – 0,65 m (z). Tieto

rok snímkovania	1969	1977	1988	1998
nadmorská výška letu [m]	3 840	3 500	3 100	3 560
priemerná relatívna výška letu H [m]	3 290	2 950	2 550	3 010
typ a $\xi$ parametre použitej kamery	MRB ck = 210,64	WILD ck = 209,83	LMK 15/2323 ck = 152,24	RMK-TOP-15 ck = 152,976
priemerná mierka	1 : 16 000	1 : 14 000	1 : 17 000	1 : 20 000
dĺžka základnice B [m]	1 140	1 210	1 530	1 810
pozdĺžny prekryt	>60%	>60%	>60%	>60%
rozmer snímky [mm]	180 x 180	180 x 180	230 x 230	230 x 230
B/H (inv. B/H)	0,34 (2,9)	0,34 (2,9)	0,6 (1,66)	0,6 (1,66)

**Tab. 1** Základné parametre použitých archívnych leteckých snímok

rok	priemerná mierka	rozlíšenie digitálnych snímok	priestorové rozlíšenie na zemskom povrchu	
			x,y	z
1969	1 : 16 000	14 $\mu$	0,22 m	0,64 m
1977	1 : 14 000	14 $\mu$	0,20 m	0,57 m
1988	1 : 17 000	14 $\mu$	0,24 m	0,40 m
1998	1 : 20 000	14 $\mu$	0,27 m	0,45 m

Tab. 2 Rozlíšenie použitých archívnych LMS

hodnoty vyjadrujú minimálne rozmery reálnych objektov, ktoré je možné na digitálnych snímkach pri tomto rozlíšení spoľahlivo rozoznať a identifikovať. Konkrétne hodnoty pre jednotlivé súbory snímok sú ovplyvnené najmä relatívnou výškou letu a parametrami použitej kamery a uvádzame ich v **tab. 2**.

#### 4.2 VLÍCOVANIE BODY

Aby bolo možné digitálne letecké snímky spracovávať, bolo nevyhnutné pred vytvorením samotných projektov vybrať na snímkach aj v teréne zreteľne identifikovateľné body, tzv. vlíčovacie body (angl. Ground Control Points), ktoré slúžili ako spojovací článok medzi jednotlivými snímkami snímkového bloku (resp. stereomodelu) ako aj medzi stereomodelom a územím (georeferencovanie modelu). Výber bodov sme realizovali na LMS pred samotným meraním v teréne, aby sme mali istotu, že dané body sú skutočne na snímkach identifikovateľné. Pre tento účel sme vybrali celkovo vyše 20 bodov v stabilnom území tak, aby boli rovnomerne rozmiestnené okolo záujmového územia. Keďže sme spracovávali snímky z viacerých období, snažili sme sa vybrať body, ktoré boli rozpoznateľné na snímkach zo všetkých časových období. Pri terénnom meraní sa nám napokon podarilo spoľahlivo identifikovať a zmerať 17 bodov (**obr. 2**).

Priestorové súradnice vlíčovacích bodov sme zamerali pomocou GPS technológie, pričom sme použili geodetické GPS prístroje Sokkia Stratus a Promark-3. Zameriavanie sme realizovali metódou statického diferenciálneho merania s následným postprocesingovým spracovaním nameraných dát v programe Ashtech Solution. Vzdialenosť medzi bázou a meranými vlíčovacími bodmi neprekročila 1,5 – 2 km. Presnosť určenia súradníc v geodetickom súradnicovom systéme WGS-84 sa pohybovala v rozmedzí 0,005 – 0,007 m v polohe a 0,008 – 0,012 m vo výške. Súradnice boli ná-

sledne transformované do národného polohového súradnicového systému S-JTSK s polohovou presnosťou  $m_{xy} = 0,05 - 0,06$  m a výškovou presnosťou  $m_z = 0,10$  m (Bpv). Transformácia súradníc do národného súradnicového systému sice pri podobných projektoch nie je nevyhnutná, no na druhej strane umožňuje tak porovnávanie získaných výsledkov s údajmi z iných zdrojov, ako aj ich ďalšie využitie v budúcnosti.

#### 4.3 FOTOGRAMETRICKÉ SPRACOVANIE SNÍMOK

Digitálne snímky sme spracovávali v prostredí digitálneho fotogrametrického systému ImageStation SSK (Stereo Softcopy Kit). Pomocou jeho jednotlivých modulov bola riešená vnútorná a vonkajšia (relatívna aj absolútna) orientácia, zber výškového poľa pre tvorbu DMT aj tvorba ortofotosnímkov územia. Prvým krokom digitálneho fotogrametrického spracovania snímok bolo riešenie vnútornej orientácie afinnou transformáciou digitálnych súradníc rámových značiek na ich známe kalibrované hodnoty (získané z kalibračných protokolov). Následným krokom bolo riešenie vonkajšej orientácie – relatívnej (vzájomnej) a absolútnej. Relatívnou orientáciou snímok bol pomocou výberu spojovacích bodov vytvorený stereomodel územia a pomocou absolútnej orientácie, s využitím geodeticky zameraných vlíčovacích bodov, sme stereomodelu priradili požadovanú mierku a orientovali ho vzhľadom na reálny geodetický súradnicový systém. Všetky kroky boli robené automaticky využitím procesu digitálnej obrazovej korelácie a obrazového priradovania (Image Matching).

Limity pre presnosť (resp. precíznosť) digitálneho spracovania boli vopred stanovené a špecifikované hodnotami maximálnej strednej kvadratickej chyby na vlíčovacích bodoch ( $RMSE \leq 0,10$  m), resp. celkovej štandardnej odchýlky výpočtu vyrovnania ( $SD \leq 5$   $\mu$ ). Hod-

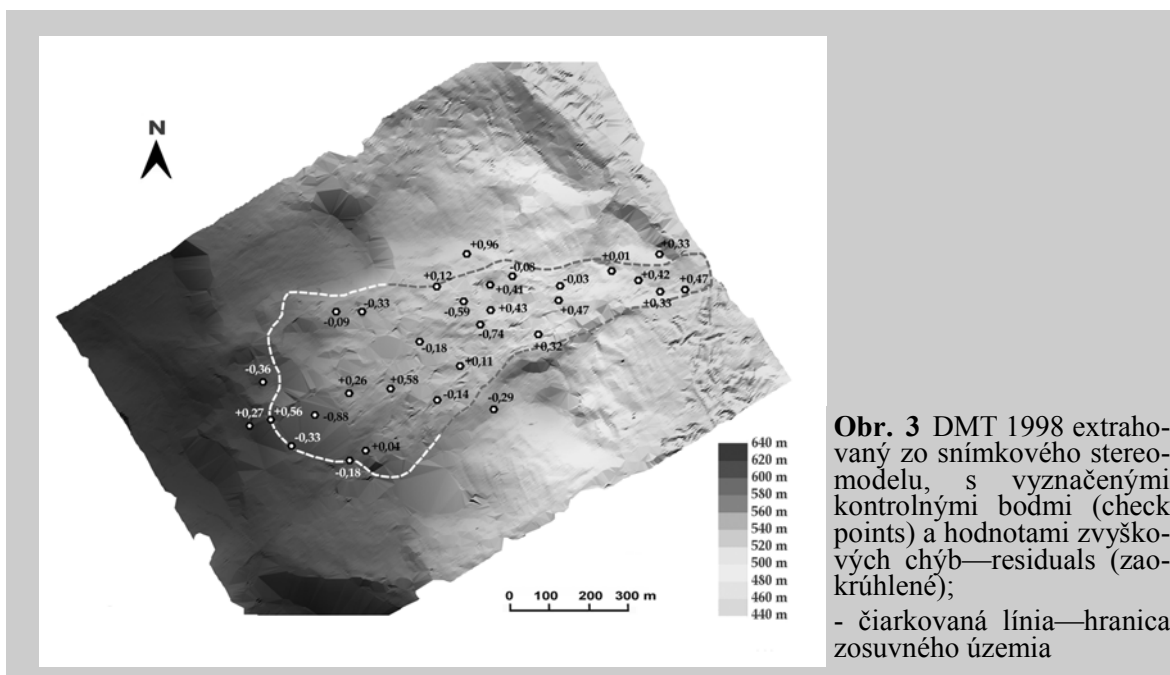
			1998	1988	1978	1969
vnútorná presnosť metódy (precision)	RMSE (vlícovacie body) [m]	x	<b>0,004</b>	0,003	<b>0,005</b>	0,000
		y	<b>0,005</b>	0,005	<b>0,005</b>	0,000
		z	<b>0,005</b>	0,010	<b>0,007</b>	0,001
	celková $\sigma$ výpočtu vyrovnania	[ $\mu$ m]	<b>3,8</b>	2,4	<b>4,4</b>	2,8
		[m]	<b>0,073</b>	0,043	<b>0,062</b>	0,044

**Tab. 3** Štatistické parametre, charakterizujúce presnosť (precision) automatického spracovania digitálnych stereomodelov

noty, ktoré boli napokon dosiahnuté v jednotlivých projektoch, charakterizujú presnosť ich digitálneho spracovania (tab. 3).

Skutočnú presnosť (accuracy) vytvorených stereomodelov je však možné vyhodnotiť len pomocou nezávislých kontrolných bodov (check points), ktoré do tvorby modelov nevstupujú. Pri podobných štúdiách však zväčša narážame na nedostatok vhodných, resp. presne lokalizovateľných kontrolných bodov. V našej práci sme na tento účel využili sieť 30 geodetických bodov, lokalizovaných priamo na území zosuvu (25 monitorovacích bodov „P“ resp. v jeho okolí (5 kontrolných stabilných bodov „F“). Napriek tomu, že sa väčšina bodov nachádza na nestabilnom území, ich využitie bolo nielen možné, ale aj výhodné. Keďže monitorovacia sieť je od jej vybudovania v roku 1988 pravidelne premeriavaná, sú k dispozícii presné (geodeticky zamerané) hodnoty ich súradníc, časovo zodpovedajúce projektom 1988

a 1998. Súradnice a nadmorské výšky monitorovacích bodov „P“ a „F“ z jednotlivých meraní sú deponované v archíve Geofondu SR (KLUKANOVÁ et al. 1998). Navyše medziročné pohyby monitorovacích bodov v období 1988 až 1998 boli natoľko malé, že vzhľadom na možnosti, ktoré poskytuje nami použitá metóda, sme ich, aj pri určitom časovom nesúlade (niekoľko mesiacov) medzi zhotovením snímok a zameraním bodov, mohli považovať za zanedbateľné. Za výhody považujeme možnosť relatívne presnej lokalizácie kontrolných bodov na snímkach ako aj možnosť charakterizovať presnosť modelov (stereomodelov aj DMT) priamo v záujmovom území. Na vyhodnotenie presnosti stereomodelu 1977 sme využili stabilné body „F“ lokalizované mimo zosuvu (použili sme pritom hodnoty súradníc z roku 1988) a súradnice 11 piezometrických vrto, vybudovaných a geodeticky zameraných na jeseň 1977. Štatistickým vyhodnotením zvyš-



**Obr. 3** DMT 1998 extrahovaný zo snímkového stereomodelu, s vyznačenými kontrolnými bodmi (check points) a hodnotami zvyškových chýb—residuals (zaokrúhlené);  
- čiarkovaná línia—hranica zosuvného územia

rok	predpokladaná presnosť [m] (teoretická)			pozorovaná presnosť (skutočná)[m] hodnoty RMSE na kontrolných bodoch			
	$\delta_{x,y}$	$\delta_z$	$\delta_{xy}$	RMSE(x)	RMSE(y)	RMSE(z)	RMSE(xy)
1998	0,10	0,17	0,14	0,39	0,96	0,41	0,74
1988	0,09	0,14	0,13	0,39	0,58	0,46	0,49
1977	0,07	0,20	0,10	0,47	0,97	0,43	0,35
1969	0,08	0,23	0,11	–	–	–	–

**Tab. 4** Porovnanie reálnej presnosti (accuracy) digitálnych stereomodelov s teoretickými hodnotami vypočítanými na základe matematických vzťahov:  $\sigma_{x,y} = 0,35 \cdot p_x \cdot M_s$  a  $\sigma_z = 0,35 \cdot p_x \cdot M_s \cdot H/B$ ; kde  $p_x$  = veľkosť pixel-a [m],  $M_s$  = mierkové číslo snímky

kových chýb (rozdielov medzi danými a modelovými súradnicami) na kontrolných bodoch sme získali obraz o celkovej kvalite stereomodelov v kľúčovej časti územia. Použitým ukazovateľom presnosti je hodnota strednej kvadratickej chyby RMSE (**tab. 4**). Dosiagnuté hodnoty sme porovnali s teoretickými hodnotami presnosti, akú možno dosiahnuť pri spracovaní digitálnych snímok s danými parametrami a pri stanovenej limitnej hodnote presnosti výpočtu vyrovnania (v našom prípade 5  $\mu\text{m}$ , čo zodpovedá hodnote 0,35 pixela). Ako vidieť z tab. 4, teoretické hodnoty sú o niečo optimistickejšie než skutočne dosiahnutá presnosť stereomodelov, a to aj napriek tomu, že celková štandardná odchýlka výpočtu vyrovnania sa pohybovala pri jednotlivých modeloch od 2,4 do 4,4  $\mu\text{m}$ , čo je menej, než nastavená limitná hodnota.

Presnosť stereomodelu územia z roku 1969 nebolo žiaľ možné týmto spôsobom vyhodnotiť pre nedostatok vhodných kontrolných bodov.

#### 4. 4 DIGITÁLNE MODELY TERÉNU

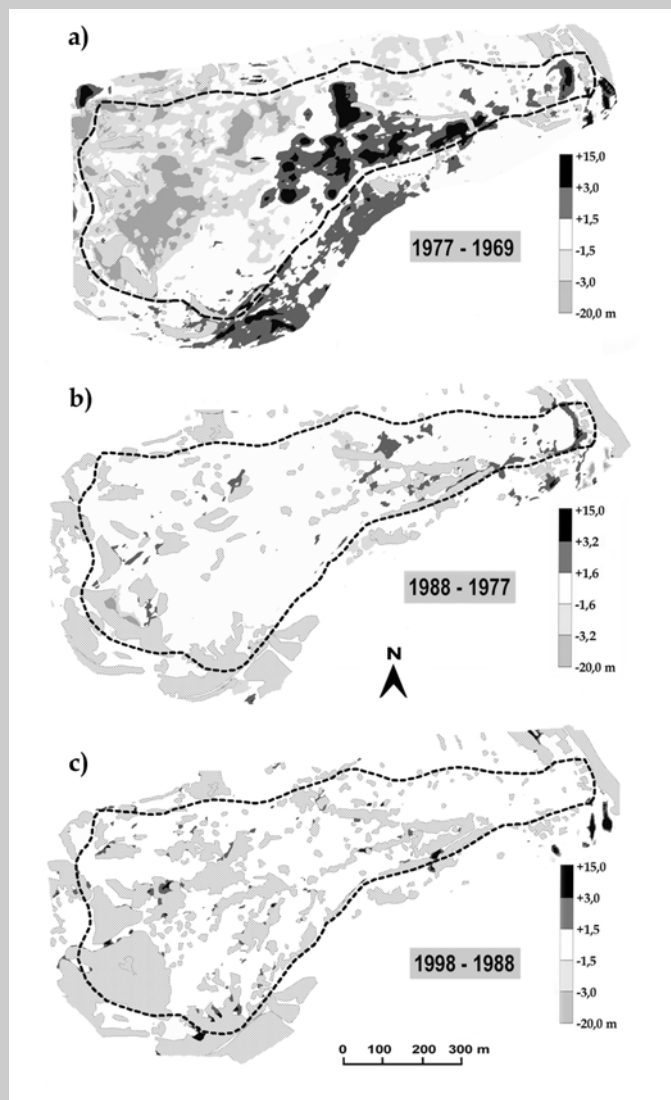
Digitálna obrazová korelácia bola využitá aj na zber bodov výškového poľa pre tvorbu DMT. Jednotlivé DMT s gridom 5x5 m boli následne vygenerované zo všetkých stereomodelov. Keďže touto metódou nie je možné vyhodnocovať výšku terénu v zalesnených alebo zastavaných územiach, boli takéto oblasti definované ako tzv. „obscured areas“ a vyňaté zo zberu dát pre DMT.

Aby bolo možné hodnoverne interpretovať produkty odvodené zo základných DMT, bolo potrebné vyhodnotiť aj presnosť derivovaných DMT. K zmene kvality DMT mohlo dôjsť najmä pri procese interpolácie. Kvalita DMT závisí od viacerých faktorov nielen od samotnej presnosti zozbieraných výškových bodov, ale aj od ich hustoty, od použitej interpolačnej me-

tódy a pod. (viac informácií možno nájsť napr. v prácach ŠURI et al. 2003, KRAUS et al. 2004, KAREL, KRAUS 2006). Možno preto logicky očakávať menšiu presnosť DMT v oblasti, kde hustota zozbieraných bodov bola nízka, resp. nedostatočná a naopak.

Na zhodnotenie výškovkej presnosti DMT sme použili tie isté body ako v prípade stereomodelov s tým rozdielom, že ich polohu sme v tomto prípade považovali za danú a určovali sme rozdiel vo výške medzi danými (geodeticky určenými) a interpolovanými hodnotami. Rozmiestnenie kontrolných bodov na DMT je ilustrované na **obr. 3**. Získané zvyškové chyby (residual errors) sme následne štatisticky vyhodnotili pomocou ukazovateľa RMSE. Dosiagnuté hodnoty RMSE (**tab. 5**) sme porovnali s teoretickými hodnotami, ktoré možno podľa niektorých autorov (KAREL, KRAUS 2006, WIND 2001, ACKERMANN, SCHNEIDER 1992) metódou digitálnej leteckej fotogrametrie za daných podmienok (parametre použitých snímok a charakter modelovaného terénu) dosiahnuť. Hodnoty RMSE, charakterizujúce presnosť nami vytvorených modelov sú veľmi blízke hodnotám, aké boli dosiahnuté pri zodpovedajúcich stereomodeloch, zároveň sú lepšie než uvedené teoretické hodnoty. Je nutné poznamenať, že použité kontrolné body sú na predmetnom území situované v odkrytom teréne, kde kvalita aj hustota zozbieraných výškových bodov bola pravdepodobne najvyššia a charakterizujú teda len globálnu presnosť modelov, ktorá môže mať lokálne odchýlky.

Informácie o kvantitatívnych zmenách georeliéfu v zosuvnom území sme získali konštrukciou tzv. rozdielových modelov. Každý rozdielový model sme vytvorili odčítaním dvoch vstupných DMT. Vytvorili sme 3 základné modely odčítaním dvoch časovo po sebe nasledujúcich modelov „1998 – 1988“, „1988 – 1977“ a „1977 – 1969“ (**obr. 4 a, b, c**) a 1 doplnujúci model „1988 – 1969-A“, ktorý sme použili na porovnanie s rozdielovým modelom, extrahovaným z iných vstupných dát



**Obr. 4** „Rozdielové modely“, vytvorené porovnaním dvoch DMT z rozdielnych časových období:

- a) „1977 – 1969“;
- b) „1988 – 1977“;
- c) „1998 – 1988“.

Šrafované plochy predstavujú oblasti vylúčené z hodnotenia (porasty stromov a krovin); čiarkovaná línia – hranica zosuvného územia

rok	predpokladaná presnosť (teoretická)			skutočná presnosť hodnoty RMSE na kontrolných bodoch
	a)	b)	c)	RMSE [m]
1998	0,75	0,51	0,15	<b>0,43</b>
1988	0,65	0,43	0,13	<b>0,41</b>
1977	0,66	0,50	0,15	<b>0,40</b>
1969	0,75	0,56	0,16	<b>0,22*</b>

**Tab. 5** Porovnanie presnosti extrahovaných digitálnych modelov terénu s publikovanými teoretickými hodnotami

- a)  $\sigma_z = 0,15\%oh + 0,15/ck.h.tan\alpha$  (KAREL, KRAUS 2006),
- b)  $\sigma_z = 0,017\% h$  (WIND 2001),
- c)  $\sigma_z = 0,005\% h$  (ACKERMANN, SCHNEIDER, 1992), kde „h“ = priemerná výška letu, „ck“ = konštanta fotokomory, „ $\alpha$ “ = priemerný sklon terénu; (\* – nízky počet vstupných dát)



(obr. 6a). Keďže IS neponúka nástroj na tvorbu rozdielových modelov, tento krok bol realizovaný v prostredí softvéru Atlas DMT.

## 5 DISKUSIA

Výstupy získané metódou digitálnej leteckej fotogrametrie umožňujú kvantifikovať a vizualizovať výškové zmeny reliéfu v zosuvnom území. Samozrejme, interpretačná hodnota výstupov je limitovaná ich kvalitou, ktorá odráža kvalitu vstupných údajov, súčasne možnosti metódy ako aj precíznosť postupov spracovania dát.

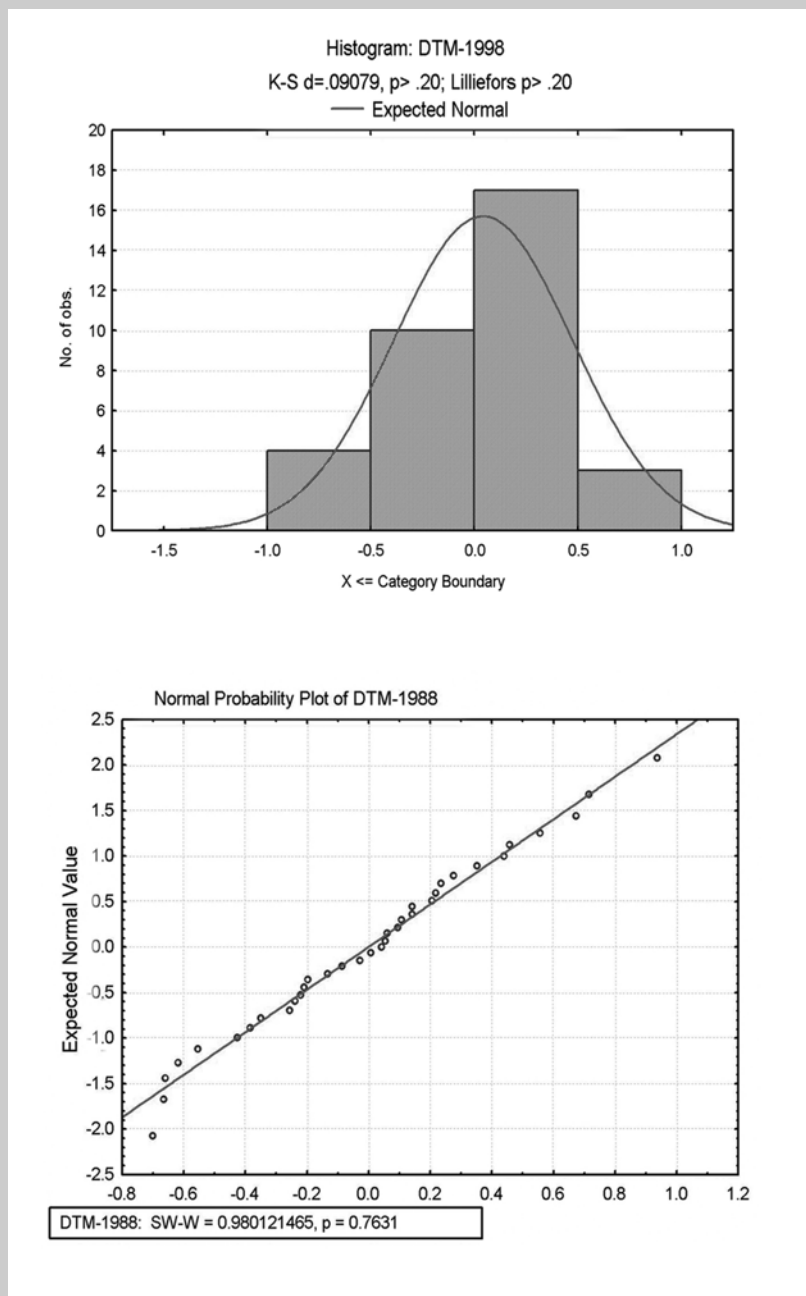
Legenda rozdielových modelov bola vytvorená tak, aby ich interpretačná hodnota zodpovedala stanovenej globálnej presnosti vstupných DMT. Vychádzali sme pritom z predpokladu, že hodnoty zvyškových chýb majú rozdelenie bližšie sa normálnemu rozdeleniu a sú teda výsledkom náhodných chýb modelov. Tento predpoklad bol samozrejme overený testovaním hodnôt v programe SPSS a Statistica (obr. 5), pričom normalita rozdelenia hodnôt nebola zamietnutá. V takomto ideálnom alebo takmer ideálnom prípade platí, že 68 % všetkých hodnôt leží v intervale 1 SD (resp. RMSE) a 95 % hodnôt v intervale  $\pm 2$  SD (RMSE). Aby naše interpretácie boli čo najspoľahlivejšie, interval neurčitosti každého vstupného modelu sme stanovili na hodnotu 2 RMSE, pričom výsledný interval neurčitosti v rozdielových modeloch je daný súčtom intervalov oboch vstupných modelov. V intervale neurčitosti sa nachádzajú oblasti, kde nie je možné zmeny reliéfu spoľahlivo kvantifikovať. To však nemusí nevyhnutne znamenať, že sú to oblasti neaktívne. Ubudnutie materiálu však mohlo byť kompenzované jeho prírastkom a tak celková výšková zmena terénu sa zdá byť nulová (resp. sa nachádza v nami stanovenom intervale neurčitosti). Kladné hodnoty nad týmto intervalom charakterizujú oblasti, kde v dôsledku nahromadenia materiálu došlo vzniku elevácií, záporné hodnoty charakterizujú oblasti, z ktorých bol materiál zosuvným procesom odstránený.

Rozdielový model „1977 – 1969“ reprezentuje časový interval, v ktorom prebehol katastrofický event. Vo vrchnej časti zosuvu sú zreteľne identifikovateľné oblasti so zápornou zmenou výšky, kde evidentne došlo k úbytku materiálu. Najvýraznejšia akumulácia zosuvných hmôt sa nachádza v strednej (transportačnej) časti zosuvu, menšie akumulácie sú identifikovateľné v čele zosuvu. Naše výsledky korelujú so zisteniami inžiniersko-geologického prieskumu z roku 1977 (FUSSGÄNGER et al. 1978), pri ktorom boli najvýraznejšie pohyby zaznamenané práve v transportačnej zóne

(celkovo až 49 m). Rozdielový model „1988 – 1977“ indikuje výškové zmeny menšieho rozsahu vo vrchnej aj strednej časti zosuvu. Predpokladáme, že maximum týchto zmien sa odohralo ešte počas roku 1977, resp. začiatkom roku 1978 a reprezentujú fázu doznievania zosuvných pohybov z jarného obdobia 1977. Zmeny reliéfu v časovom intervale 1998 – 1988 boli malého rozsahu a intenzity (etapa stabilizácie zosuvu) a vzhľadom k limitovanej presnosti extrahovaných dát ich nebolo možné kvantifikovať. Tieto výsledky zodpovedajú aj údajom z geodetického monitoringu v danom období (KLUKANOVA et al. 1998). Prírastky materiálu, ktoré sú na rozdielovom modeli viditeľné, sa nachádzajú výlučne na hraniciach definovaných „obscured areas“, čo limituje možnosti ich interpretácie.

Pre overenie metodiky a testovanie hodnovernosti získaných výsledkov, sme generovali rozdielový model zosuvného územia aj iným spôsobom (model „1988 – 1969 B“). Vstupné DMT sme derivovali z topografických máp zosuvného územia, zodpovedajúcich rokom 1969 a 1988. Mapy boli vypracované univerzálnou fotogrametrickou metódou v mierke 1:2000 (GREGOR et al. 1989 a 1990). Výšková presnosť  $m_z$  takto vytvorených máp by mala zodpovedať hodnote 0,025 Ms (mm) (BITTERER 2005), čo je v našom prípade 0,4 – 0,5 m. Interval neurčitosti sme v legende rozdielového modelu „1988 – 1969 B“ stanovili na hodnotu  $\pm 1$  m. Aby sme mohli pristúpiť k relevantnému porovnaniu rozdielových modelov, vytvorili sme rozdielový model, zachytávajúci rovnaký časový interval aj z DMT, extrahovaných metódou digitálnej leteckej fotogrametrie (model „1988 – 1969 A“). Z porovnania modelov (obr. 6 a, b) je zrejme, že zmeny terénu na oboch rozdielových modeloch majú nielen rovnaký trend, ale aj porovnateľný rozsah denudačných a akumulčných oblastí. O niečo menší plošný rozsah „záporných“ aj „kladných“ oblastí na rozdielovom modeli „A“ je zjavne daný len väčším rozsahom intervalu neurčitosti  $\pm 1,5$  m v porovnaní s modelom „B“.

Naše výstupy preukazujú použiteľnosť metódy na kvantifikáciu vertikálnych pohybov nad hranicou cca  $\pm 1,5$  m. Menšie zmeny sa nám nepodarilo spracovaním archívnych snímok spoľahlivo detekovať. Bolo by to možné jedine znížením intervalov neurčitosti, čím by samozrejme klesla hodnovernosť interpretácie. Na druhej strane to neznamená, že kvalitu dosiahnutých výsledkov možno hodnotiť ako nedostatočnú. Spracovanie archívnych snímok so sebou nesie viacero problémov. Najväčší problém v obdobných terénoch predstavuje práve výber vhodných vličovacích bodov (problém samozrejme narastá s vekom archívnych materiálov). Je potom nutné v procese aerotriangu-

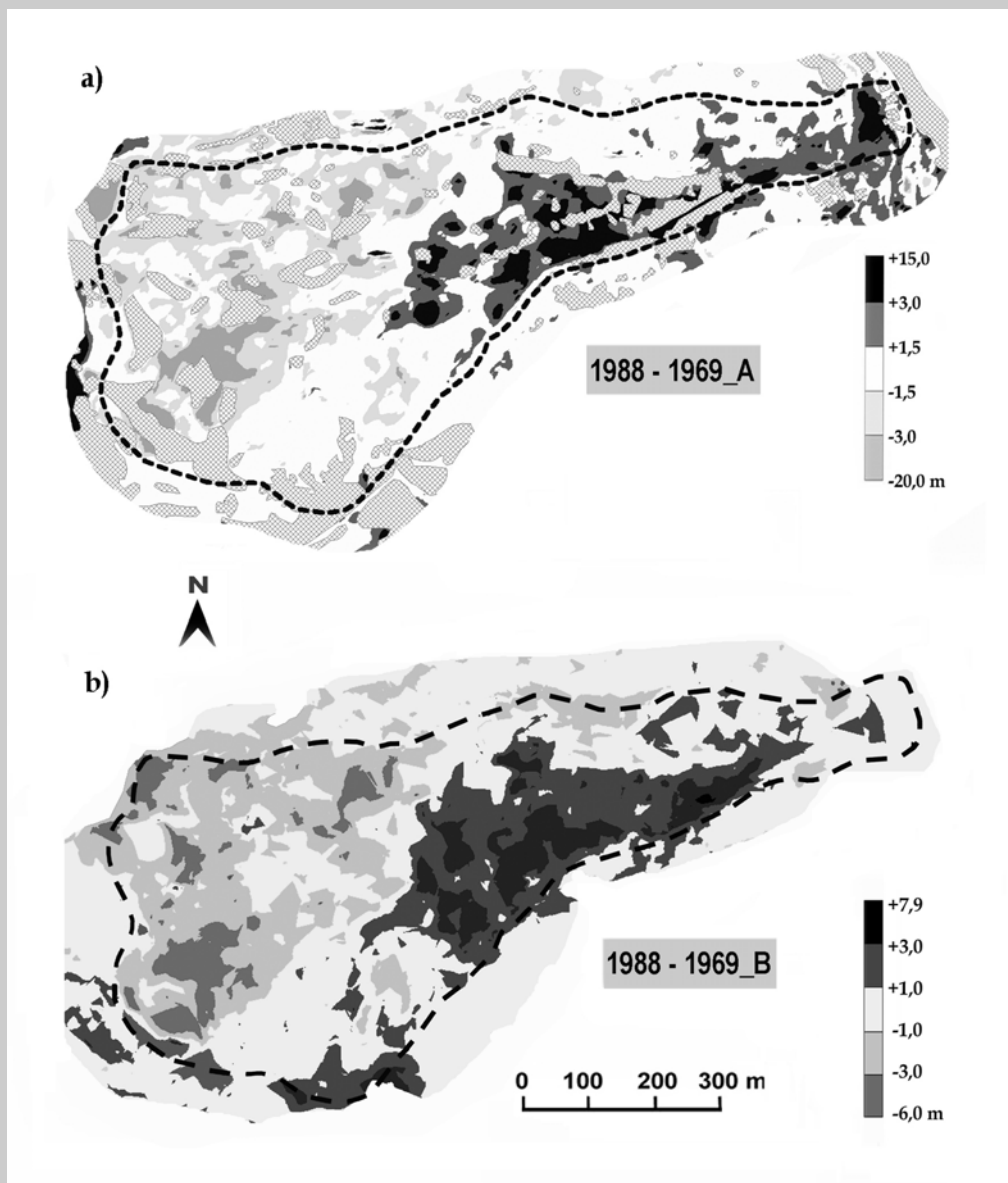


**Obr. 5** Charakter rozdelenia hodnôt zvyškových chýb (residuals) na DMT 1998

lácie využiť body, ktoré buď nepredstavujú ideálne riešenie alebo ich nie je možné identifikovať na snímkach s takou presnosťou ako v prípade signalizovaných bodov inštalovaných „ad hoc“ pred samotným náletom. Predpokladáme, že práve tento fenomén najvýraznejšie prispel k zhoršeniu presnosti nami vytvorených stereomodelov a z nich odvodených DMT v porovnaní s možnými teoretickými hodnotami, uvedenými v tabuľke 5.

## 6 ZÁVER

Archívne LMS sa ukázali ako perspektívny zdroj údajov pre modelovanie zmien reliéfu v časovom intervale niekoľkých desaťročí. Relatívne efektívne získanie dát umožňuje neustále napredujúci vývoj v oblasti vývoja digitálnych fotogrametrických systémov. Naša štúdia predbežne preukázala, že automaticky extrahované dáta z archívnych LMS s priemernou



**Obr. 6** Výškové zmeny v zosuvnom území za obdobie 1988 – 1969:

- a) vstupné DMT boli extrahované automaticky z archívnych LMS metódou digitálnej fotogrametrie;
- b) vstupné DMT vytvorené z vektorizovaných máp mierky 1:2000, vypracovaných univerzálnou fotogrametrickou metódou; šrafované plochy predstavujú oblasti vyňaté z hodnotenia; čiarkovaná línia – hranica zosuvného územia

mierkou 1 :14 000 až 1 : 20 000 sú presnosťou porovnateľné s výstupmi v mierke 1 : 2 000, zhotovenými univerzálnou fotogrametrickou metódou, a je pomocou nich možné kvantifikovať vertikálne zmeny reliéfu dosahujúce hodnoty minimálne  $\pm 1,5$  m za sledované obdobie. Metodika je preto vhodným nástrojom na kvantifikáciu výraznejších zmien reliéfu, alebo môže byť vhodným doplnkových nástrojom

popri bodovom geodetickom monitoringu. Ne-zastupiteľné miesto však môže mať pri spätnom štúdiu nielen svahových procesov, ale zmien reliéfu vo všeobecnosti. V ďalšom výskume je potrebné zamerať sa na možnosti vylepšenia presnosti extrahovaných dát, ako aj na metodicky odlišné spôsoby overenia a zhodnotenia presnosti extrahovaných DMT, resp. rozdielových modelov tak, aby bolo možné hod-

noverne interpretovať získané dáta aj prípade, že na modelovom území nie sú k dispozícii vhodné kontrolné body.

Z hľadiska využitia digitálnej fotogrametrie pre štúdie podobného typu sa zameriame na samotné postupy spracovania. Pri práci s archívnymi materiálmi narážame často na mnohé ťažkosti. Najčastejšie je to nedostupnosť kalibračných protokolov ku starším typom kamier (čo našťastie nebol náš prípad) a najmä absencia dostatočného počtu spoľahlivo identifikovateľných vlícovacích bodov. Rovnako aj použitie viacerých typov softvérov na získanie výstupných rozdielových modelov mohlo viesť k ďalšiemu prerastovaniu snímok a ovplyvniť výslednú presnosť výstupov. Z tohto hľadiska považujeme za potrebné do budúcnosti hľadať zjednodušenie celého pracovného postupu aj prípadnou zmenou použitého softvéru. Medzičasom boli vyvinuté algoritmy, ktoré umožňujú spoľahlivejšiu identifikáciu a vyhľadávanie spojovacích bodov pre účely digitálneho spracovania leteckých snímok aj na menej kvalitných materiáloch, akými nepochybne archívne snímky (najmä tie staršieho dáta) sú a tiež kvalitnejšiu extrakciu digitálnych modelov terénu.

### POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol v rámci projektu I/4052/07. Autori ďakujú grantovej agentúre VEGA za finančnú podporu. Za pomoc pri terénnych prácach a digitalizácii mapových podkladov ďakujeme Ivanovi Miklošovi, za otestovanie hodnôt zvyškových chýb v programe Statistica Jarmile Krojrovej. Autori ďakujú Topografickému ústavu Armády SR v Banskej Bystrici za poskytnutie digitálnych archívnych LMS a geodetickej firme Ornth s.r.o. za zapožičanie GPS prístrojov.

### LITERATÚRA

- ACKERMANN, F., SCHNEIDER, W. (1992). Experience with automatic DEM generation. *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(B4), 986-989.
- BALTSAVIAS, E.P. (1996). Digital ortho-images – a powerful tool for the extraction of spatial- and geo-information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51, 63-7.
- BITTERER, L. (2005). <http://svf.utc.sk/kgd/skripta/fotogrametria/index.html>.
- CASSON, B., DELACOURT, C., ALLEMAND, P. (2005). Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface – Application to the La Clapière landslide (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 425-437.
- DEWITTE, O., JASSELETTE, J.C., CORNET, Y., VAN DEN ECKHAUT, M., COLLIGNON, A., POESEN, J. & DEMOULIN, A. (2008). Tracking landslide displacement by multi-temporal DTMs: A combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology*, 99, 11-22.
- FABRIS, M., PESCI, A. (2005). Automated DEN extraction in digital aerial photogrammetry: precision and validation for mass movement monitoring.
- FUSSGÄNGER, F., JADROŇ, D., BANSKÝ, M., TYLEČEK, B. (1978). *Lubietová – prírodný zosun*. Záverečná správa z predbežného inžiniersko-geologického prieskumu zosunu. Archív Geofond, Bratislava, 79 s.
- GENTILI, G., GIUSTI, E., PIZZAFERRI, G. (2002). Photogrammetric Techniques for the Investigation of the Corniglio Landslide. In Allison R. J. (eds.): *Applied Geomorphology: Theory and practice*, Willey and Sons, Ltd., 39-48.
- GREGOR, V., SOKOL, Š., FABIAN M., BARTOŠ, P., KUBALCOVÁ E. (1989). *Účelová mapa Lubietová, 1:2000*. Archív, Geofond, Bratislava.
- GREGOR, V., BARTOŠ, P., KUBALCOVÁ E. (1990). *Účelová mapa Lubietová, 1:2000, stav z roku 1969*. Archív, Geofond, Bratislava.
- GREŠKOVÁ, A. (2002). Dynamika a transformácia nivy rieky Moravy študovaná pomocou historických máp a leteckých snímok. *Geomorphologia Slovaca*, II, 2, 40-44.
- GREŠKOVÁ, A. (2003). Geographic information system and aerial photographs as a tool for identification of standing water bodies and landforms in flooded areas. *Geomorphologia Slovaca*, III, 2, 19-21.
- KAREL, W., KRAUS, K. (2006). Quality Parameters of Digital Terrain Models. In: "Checking and Improving of Digital Terrain Models/Reliability of Direct Georeferencing, Official Publication No 51", 125-139.
- KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R. (2002). Monitoring of active rock glacier by means of digital photogrammetry. *Proceedings of the*

- ISPRS Commission III Symposium "Photogrammetric Computer Vision", September 9-13, 2002, Graz, Austria, IAPRS, Vol. 34, Part 3B, 108-111.
- KLUKANOVÁ, A., WAGNER, P., ONDRÁŠIK, M., JÁNOVÁ, V., LIŠČÁK, P., MATYS, M., VLČKO, J., KOVÁČIKOVÁ, M., HRAŠNA, M., BODIŠ, D., MOCZO, P., IGLÁROVÁ, E., FRANKOVSKÁ, J. (1998). Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia Slovenskej republiky, stav k 31.12.1997, orientačný prieskum geologických činiteľov. Záverečná správa, Archiv Geofond, 238 s., 172 príl., 4 diely.
- KRAUS, K., BRIESE, C., ATTWENGER, M., PFEIFER, N. (2004). Quality measures for digital terrain models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 35, Part 2, 113-118.
- METTERNICHT, G., HURNI, L., GOGU, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98, 284-303.
- NEMČOK, A. (1982). *Zosuvy v slovenských Karpatoch*. Veda, Bratislava, 319 s.
- ONDRÁŠIK, M. (2002). Monitoring erózných procesov – hodnotenie výmoľovej erózie z leteckých meračských snímok. *Geologické práce 106, Správy 106*, Štátny geologický ústav D. Štúra, Bratislava, 43-52.
- PIŠÚT, P. (1994). Morfogenéza a datovanie pririečnej nivy Dunaja na príklade ostrova Kopač pri Bratislave. *Geografický časopis*, 46, 3, 291-306.
- PIŠÚT, P. (2000). *Vývoj koryta Dunaja na území Bratislavy v.18. – 20. storočí podľa historických máp*. Dizertačná práca, PriFUK, Bratislava.
- STANKOVIANSKY, M. (1994). Hodnotenie reliéfu povodia Vrzávky so zvláštnym zreteľom na jeho súčasnú modeláciu. *Geografický časopis*, 46, 3, 267-282.
- STANKOVIANSKY, M. (2001). Erózia z orania a jej geomorfologický efekt s osobitým zreteľom na myjavsko-bielokarpatskú kopaničiarsku oblasť. *Geografický časopis*, 53, 2, 95-110.
- ŠÚRI, M., CEBECAUER, T., HOFIERKA, J. (2003). Digitálne modely reliéfu a ich aplikácie v životnom prostredí. *Životné Prostredie*, Vol. 37, No 1, 30-35.
- VAN WESTEN, C.J., GETAHUN F.L. (2003). Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. *Geomorphology*, 54, 77-89.
- WALSTRA, J., CHANDLER, J.H., DIXON, N., DIJKSTRA, T.A. (2004). Time for change – quantifying landslide evolution using historical aerial photographs and modern photogrammetric methods. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 35; Part 4, 475-480.
- WIND, M. (2001). Accuracy of automatically collected height data over Denmark. *The 20<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, 6-10 August, Beijing, China, Vol. 3, pp. 1984-1991.