

Stabilitné zhodnotenie zosuvného územia Bojničky na základe geofyzikálnych a geodetických GNSS meraní (Nitrianska pahorkatina)

Lenka Petrydesová¹, René Putiška² & Pavel Liščák³

¹Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; petrydesova@fns.uniba.sk

²Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; putiska@fns.uniba.sk

³Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 81704 Bratislava; pavel.liscak@geology.sk

AGEOS Stability analyses of Bojničky landslide area based on geophysics and geodetic GNSS measurements (Nitrianska pahorkatina Upland)

Abstract: With the development expanding into the unstable hillslope areas under the pressures of increasing population and urbanization, extremely rainfall due to climate change and human activities such as deforestation or excavation of slopes for road cuts and building sites etc. have become important triggers for landslide occurrence with negative consequences. Stability of slopes is one of the basic engineering problems in the building constructions and design. Slope deformation near by Bojničky village is part of the large landslide area of the western boundary of Nitrianska pahorkatina Upland, between the towns of Hlohovec and Sereď. Moreover, these landslides should be in contact with the perspective construction of planned Water Work Hlohovec–Sereď. Selected landslide part of Bojničky has been periodically monitored since 1993 within project of Ministry of Environment “Partial Monitoring System of Geological Factors of Environment in the Slovak Republic”. In the selected landslide, there were realized the geophysical measurement using multicable, and GNSS measurements during period of 2010 – 2012. Geotechnical model was created on the base of resistivity data and lithology from existing boreholes. The results of stability analyses and GNSS monitoring of surface changes by a network of observed points indicate the instability of whole landslide body. The instability of slope has been proven in the central part of landslide, where the degree of stability was less than 1.1 even at dry condition (without influence of groundwater). Also, the results of geodetic GNSS measurements suggest increased activity particularly of partial scarp zones (points HSJ-37A and HSJ-38). The major measured changes of monitored points were detected just after the extreme precipitation fallen in the area in June 2011 (80.6 mm). Based on stability’s research the landslide has been considered to be the unstable, which was documented not only stability analyses but also position and elevation changes of observation points.

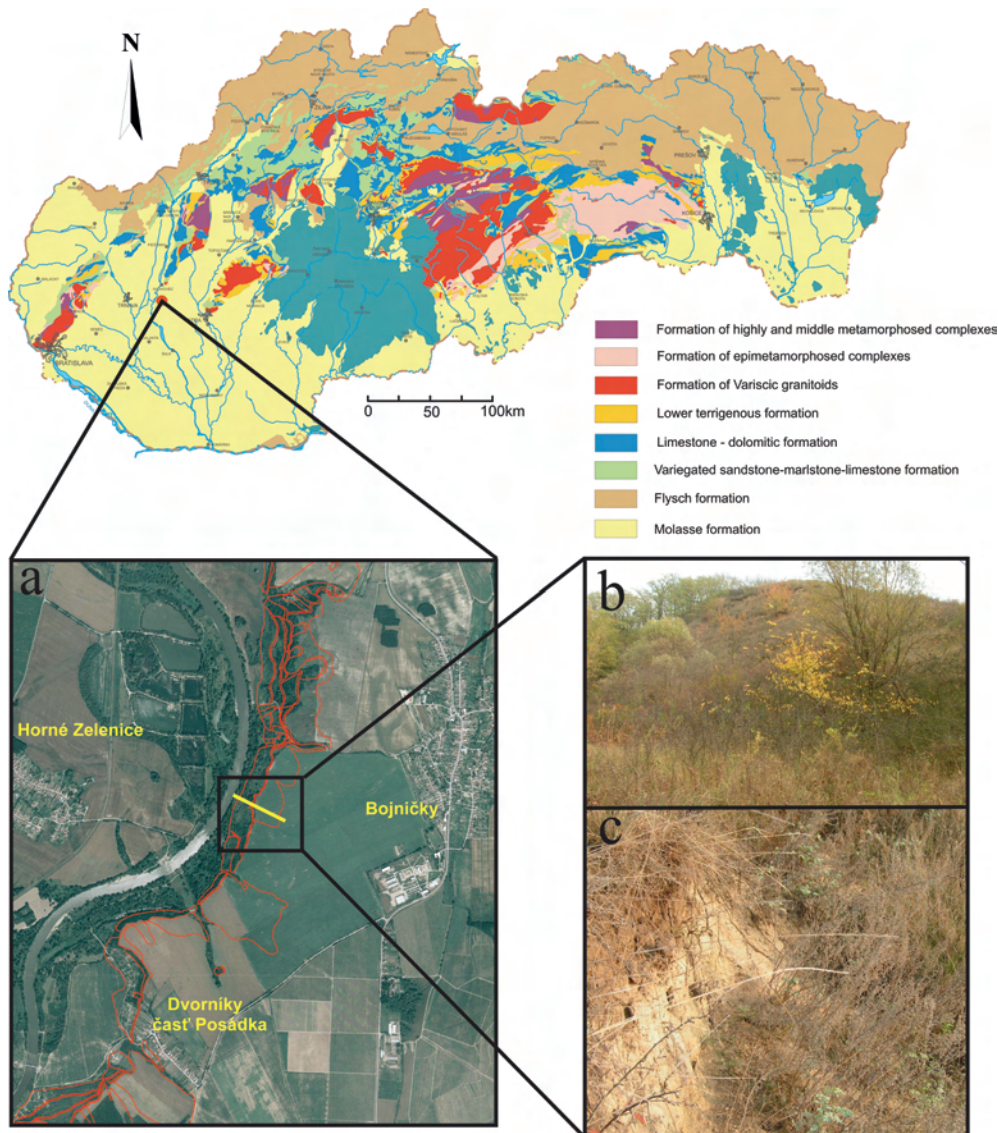
Key words: Nitrianska pahorkatina Upland, Bojničky village, landslide, stability analyses, ERT measurement, GNSS measurements

1. ÚVOD

Svahové deformácie na území Slovenska sú jedným z najrozšírenejších a do istej miery aj najnebezpečnejších geohazardov. Predstavujú pomerne veľký problém nielen pri realizácii inžinierskych a stavebných diel, ale aj pri ich samotnom využívaní. Rastúca urbanizácia, neustály rozvoj výstavby v územiach s výskytom svahových deformácií, pokračujúce odlesňovanie a extrémne zážkovité úhrny v dôsledku klimatických zmien však výrazne zvyšujú riziko vzniku a aktivizácie zosuvov s nepriaznivými dôsledkami. Pri riešení stability perspektívnych území z hľadiska rozvoja technosféry je dôležité poznať príčinu a mechanizmus vzniku, resp. aktivizácie svahových deformácií (Wagner et al., 2002). V území medzi Hlohovcom a Sereďou sa už od konca 50-tych rokov uvažuje o perspektívnej výstavbe vodného diela Hlohovec–Sereď. Samotná koncepcia vodného diela je širokej odbornej verejnosti

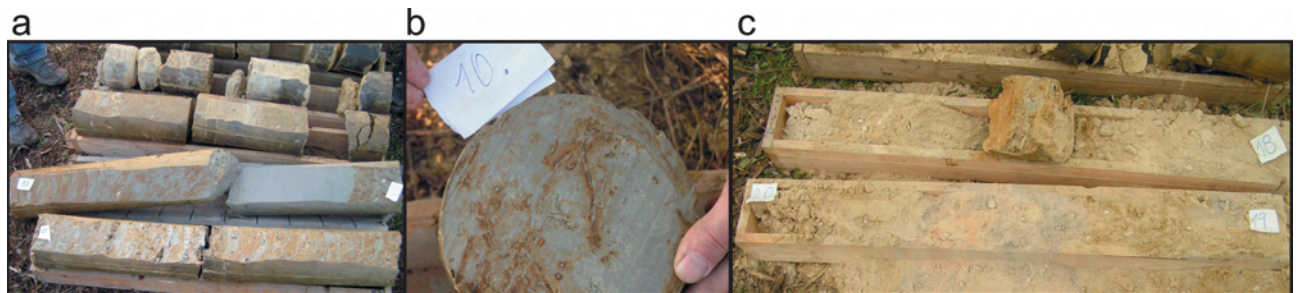
známa a je podrobne rozpísaná na web stránke Vodohospodárskej výstavby š. p. (www.vvb.sk, 2012). Toto dielo má však prísť do priameho kontaktu so známym zosuvným územím na západnom okraji Nitrianskej pahorkatiny. Zosuvné svahy s celkovou rozlohou 5,98 km² sa vyskytujú na ľavej strane rieky Váh. V súvislosti s projektovaným dielom sa do popredia dostáva otázka stability svahov, ktoré budú v bezprostrednom kontakte s navrhovanou stavbou. Jedným z takýchto úsekov je aj lokalita neďaleko obce Bojničky. Zosuvný svah sa nachádza v okrese Hlohovec, západne od obce Bojničky a severne od obce Dvorníky, časť Posádka (Obr. 1). Podľa Mapy zosuvného hazardu (Bednarik et al., 2012), patrí záujmový svah do veľmi vysokého stupňa zosuvného hazardu a zo stabilného hľadiska je veľmi citlivý.

Práve v tomto úseku má viesť odpadový priesakový kanál, ktorého hlavnou úlohou bude odvádzať priesaky z neogénnych priepustných komplexov Nitrianskej pahorkatiny, ako aj priesaky



Obr. 1. Mapa litologických formácií Slovenska (zostavená podľa Vozár, Káčer et al., 1987, Hrašna, Liščák, 2003, in. Holzer et al., 2009) a schematické znázornenie a) vybranej svahovej deformácie Bojničky; b) čelný pohľad na zosuvný svah c) s viditeľnými čerstvými odtrhovými hranami (foto: Petrýdesová, 2011).

Fig. 1. The map of lithological formations of Slovakia (modified by Vozár, Káčer et al., 1987, Hrašna, Liščák, 2003, in. Holzer et al., 2009) and a) schematic situation of selected slope deformation Bojničky; b) the front view of landslide c) with the new visible minor scarps (photos: Petrýdesová, 2011).



Obr. 2. Neogénny vysokoplastický íl (skupiny F6 až F8) s hojnými limonitovými zátekmi z hĺbky 10–11 m pod terénom (a, b) a strednozrnný neogénny piesok (c) z hĺbky 19–20 m pod terénom z inklinometrického vrtu IGV-1, lokalita Dvorníky časť Posádka (foto: Petrýdesová, 2009).

Fig. 2. Neogene clay with high plasticity (F6 to F8) with limonite films from depth 10–11 m below terrain (a, b) and Neogene sand with medium granularity (c) from depth 19–20 m below terrain, core recovery from inclinometric borehole IGV-1, locality Dvorníky, part Posádka (photos: Petrýdesová, 2009).

z plánovanej vodnej nádrže. Pri jeho realizácii je potrebné sa vyvarovať podrezaniu svahu tvoreného neogénnymi horninami. V opačnom prípade by zvyšujúca sa hladina podzemnej vody v priestore medzi hrádzou a zosuvnými svahmi Nitrianskej pahorkatiny pôsobila vztlakovým účinkom na akumulčné oblasti zosuvov a tým znižovala pasívne sily pôsobiace proti zosúvaniu (Mocik et al., 2008).

Už pri terénnej obchôdzke sú viditeľné čerstvé retrográdne zátřhy, čo svedčí o porušenéj stabilite svahu, ktorá bola počítaná v programe GEO 5.2. Geotechnický model vstupujúci do stabilitej analýzy bol zostrojený na základe litológie z vrtných záznamov a elektrickej odporovej tomografie (ERT). Stabilite zhodnotenie svahu bolo doplnené o výsledky monitoringu polohových a výškových zmien zistených pomocou geodetických meraní GNSS metódou. Vzájomná korelácia viacerých monitorovacích metód napomáha nielen lepšiemu pochopeniu mechanizmu vzniku svahových deformácií, ale na základe ich podrobnejšej analýzy je možné navrhnúť a vykonať účinnejšie sanačné opatrenia (Wagner et al., 2002).

2. GEOLOGICKÉ, INŽINIERSKOGEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMERY ÚZEMIA

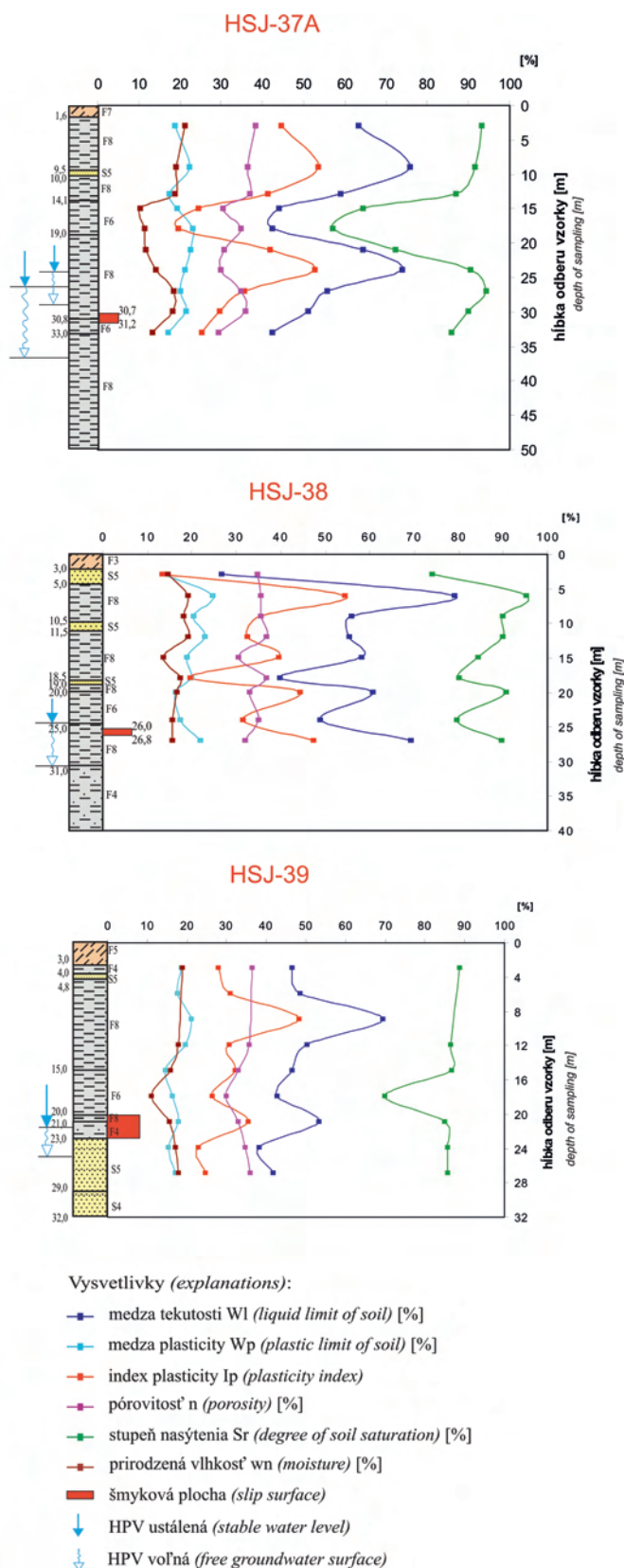
Z geomorfologického hľadiska je územie tvorené dvoma morfológicky odlišnými celkami, Dolnovážskou nivou a Nitrianskou pahorkatinou, podoblast' Zálužianska pahorkatina (Mazúr & Lukniš, 1986, in Atlas Krajiny SR, 2002).

Zosuvné územie patrí podľa regionálneho inžinierskogeologického rozdelenia (Matula & Pašek, 1986) do regiónu neogénnych tektonických vkleslín, oblasti vnútrokarpatských nížin. Horninové prostredie je charakteru molasovej formácie (Obr. 1). Na geologickej stavbe územia sa podieľajú sedimenty neogénu (vrchný neogén/pliocén, dák – ruman), ktoré sú pokryté kvartérnymi sedimentmi rôznych hrúbok.

Kvartérne sedimenty sú z genetického hľadiska tvorené fluviaálnymi náplavmi Váhu, eolicko-deluviaálnymi a proluviaálnymi sedimentami.

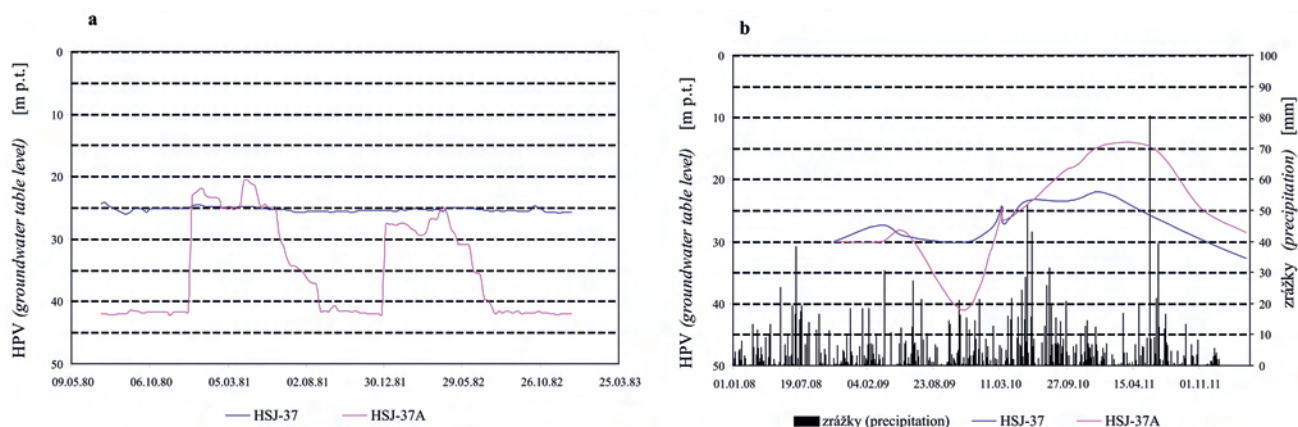
Neogénne sedimenty sú zastúpené predovšetkým mohutnými súvrstviami ílov a pieskov, miestami s polohami a šošovkami pieskocov, ojedinele zlepcov – beladické súvrstvie. V oblasti Nitrianskej pahorkatiny vystupujú v hĺbkach 0,3 až 0,7 m pod terénom a v údolnej nive Váhu v hĺbkach 8 až 20 m pod povrchom terénu. V odľučných hranách niektorých zosuvov vystupujú až na povrch územia. Sedimenty neogénu ležia transgresívne, alebo v tektonickom styku na mezozoických útvaroch, južných vybežkov Považského Inovca.

Vrstvy ílov dosahujú v zosuvnom území miestami hrúbku niekoľko desiatok metrov, alebo sa vyskytujú iba ako preplástky hrubé rádovo niekoľko centimetrov. Sú pestrofarebné (svetlohnedé, žltosivé, sivozelené, sivé až sivomodré) a vyznačujú sa hojnými limonitovými zátekmi (Obr. 2a,b). Íly obsahujú premenlivú zložku prímеси jemného a stredného piesku (10–30 %) a nadobúdajú charakter vysokoplastických ílivo-piesčitých hĺn. Okrem piesčitej frakcie obsahujú aj značné množstvo vápnitých polôh a konkrécií. Obsah vápnitých polôh je rôzny, od 0 % do 30 % a obidve formy sa vyskytujú aj vo väčších hĺbkach (do 30 m).



Obr. 3. Grafické zobrazenie litológie a vybraných fyzikálnych parametrov stanovených na vzorkách odobraných z vrtoz HSJ-37A, HSJ-38 a HSJ-39.

Fig. 3. Graphic representation of lithology and selected physical parameters specified on samples from boreholes HSJ-37A, HSJ-38 and HSJ-39.



Obr. 4. Kolísanie hladiny podzemnej vody v zdvojenom vrte HSJ-37 a HSJ-37A zaznamenané počas pozorovaného obdobia a) 1980–1983; b) 2008–2012.
Fig. 4. Ground water table level oscillation in boreholes-pair HSJ-37 and HSJ-37A measured during the observed periods a) 1980–1983; b) 2008–2012.

Vápnité prímеси spôsobujú rast parametrov šmykovej pevnosti zemín, pokles prirodzenej vlhkosti a plasticity zemín a zvyšuje priepustnosť súdržných zemín. Z hľadiska minerálneho zloženia sú íly tvorené zmesou illitu, montmorillonitu a kaolinitu.

Piesky sa podobne ako íly vyskytujú v súvislých niekoľko metrov hrubých polohách, v ojedinelých prípadoch je to 10 až 30 m, prípadne sa vyskytujú ako šošovky v íloch. Ich uloženie je subhorizontálne so sklonom do 5° k juhovýchodu až východu. Sú jemno až strednozrnité, miestami hrubozrnité, sivej, sivožltej, hnedej a žltej farby (Obr. 2c). Tvorené sú zrnkami kremeňa a obsahujú premenlivú prímесь ílovitej alebo prachovitej frakcie. Často nadobúdajú charakter až silne piesčitých hĺn (Otepka et al., 1983).

Súčasný charakter územia bol sformovaný v kvartéri, pričom dôležitú úlohu pri morfológickom formovaní územia majú práve gravitačné svahové pohyby hornín. V priebehu pleistocénu a holocénu bolo vytvorených viac generácií zosuvov, ktoré sú v súčasnosti v rôznych štádiách vývoja (Otepka et al., 1983). Podľa Otepku et al. (1983) je zosuvný svah zaradený do tretej generácie zosuvov s dvoma vývojovými štádiami. Tretia generácia je morfológicky zreteľne ohraničená a zosuvy zvyčajne dosahujú hĺbku 10–15 m, zaznamenaný je výskyt šmykových plôch v hĺbke 20–30 m. Vo vybranom úseku Bojničky šmykové plochy zistené prieskumom (vrt HSJ-37A) dosahujú hĺbku viac ako 30 m (31,2 m). Šmykové plochy sú vo väčšine prípadov prevažne rotačné alebo rotačno-planárne. Geologická stavba zosuvných svahov je charakterizovaná striedaním vysokoplastických neogénnych nepriepustných ílov (Obr. 2a,b) a zvodnených jemnozrných pieskov (Obr. 2c) so vztlakovou vodou, čo vytvára štruktúru vhodnú pre rozvoj svahových porúch (Nemčok, 1982).

V zosuvnom území bol realizovaný v 80-tych rokoch podrobný IG prieskum (Otepka et al., 1983), v rámci ktorého bolo odobraných celkovo až 445 neporušených a 583 porušených vzoriek, za účelom zistenia fyzikálno-mechanických vlastností zemín a mineralogických rozborov. V stabilitnom profile Bojničky bolo zrealizovaných 5 pozorovacích piezometrických vrtov s nasledovným označením: HSJ-37A, B, HSJ-38, HSJ-39 a HSV-40. Z týchto vrtov bolo odobraných na laboratórne spracovanie 30 vzoriek. Vybrané fyzikálno-mechanické parametre

sú znázornené na Obr. 3 spolu s geológiou vo vrtoch. Ílové zeminy sú charakteristické pomerne vysokými hodnotami medze plasticity w_p [%] a číslom konzistencie I_c , na základe ktorých je ich zatriedenie podľa STN 73 1001 do tried zemín F6 a F8. Pórovitosť zemín stanovená na odobraných vzorkách sa pohybuje v rozmedzí 30–40%, čo poukazuje na ich pomerne nízku priepustnosť a stupeň nasýtenia S_r [%], až na niekoľko vzoriek, dosiahol relatívne vysoké hodnoty. Pre ílové zeminy skupiny F6 a F8 sú charakteristické nízke normové charakteristiky šmykových parametrov a v dôsledku ich nasycovania vodou dochádza ešte k ich zníženiu, čo následne vedie k zmenšeniu stupňa stability. Všetky ostatné fyzikálno-mechanické vlastnosti stanovené v rôznych hĺbkach vo vybraných vrtoch sú uvedené v Tab. 1.

V území neporušenom svahovými deformáciami sa vyskytujú dva typy podzemných vôd, a to podzemné vody neogénnych sedimentov a podzemné vody kvartérnych sedimentov. Obeh podzemnej vody je však v telesách svahových deformácií narušený. Zvodnené horizonty sú prerušené a podzemná voda preniká do telesa zosuvov. V piesčitých polohách a v porušených a prehniatých polohách ílov sa vytvárajú dočasné horizonty podzemnej vody, ktoré sú nepravidelne doplňované.

Výskyt horizontov podzemnej vody sa viaže prevažne na polohy pieskov, prípadne na viac porušené a prehniaté úseky ílov. Kolísanie hladiny podzemnej vody v jednotlivých horizontoch je závislé na zrážkových úhrnoch s retardáciou 1–3 mesiace, z čoho vyplýva, že infiltračná oblasť sa nachádza mimo zosuvného územia, v oblasti Nitrianskej pahorkatiny východne od odlučných hrán zosuvov. Nízka priepustnosť piesčitých polôh a prevažne ílovitý vývoj pliocénnych sedimentov zapríčiňuje časové oneskorenie závislosti od vertikálneho pohybu hladiny podzemnej vody oproti zrážkam (Otepka et al., 1983).

V pozorovacom vrte HSJ-37A bolo zaznamenané výrazné kolísanie hladiny podzemnej vody (1980–1983) viac ako 20 m (21,64 m). Počas nášho pozorovaného obdobia (2008–2012) bol zaznamenaný ešte výraznejší rozkyv hladín, a to až 26,57 m (Obr. 4). K najväčšiemu stúpnutiu hladín dochádza v jarných mesiacoch v dôsledku zmenšeného výparu a transpirácie.

Kolísanie hladiny podzemnej vody vo vrte HSV-40 situovaného v aluviálnej nive Váhu korešponduje s vodným stavom

Váhu. Hladina podzemnej vody v tomto vrte kolíše v rozmedzí hĺbok 2–5 m pod terénom, čo je pomerne vysoko vzhľadom na to, že vrt sa nachádza v čele zosuvu. Podzemná voda nielenže znižuje hodnoty šmykových parametrov ílovitých zemín, ale má aj ďalšie negatívne vplyvy:

- ▶ v horných častiach zosuvov pôsobí svojou hmotnosťou a zvyšuje aktívne sily;
- ▶ vztlakovými účinkami pôsobí na nadložné nepriepustné vrstvy, nadľahčuje ich a tým znižuje pasívne sily najmä v dolných častiach svahov;
- ▶ prúdovým tlakom znižuje stabilitu svahov a v jemnozrnných piesčitých a prachovitých materiáloch spôsobuje ich vyplavovanie;
- ▶ v neogénnych vápnných sedimentoch zoslabuje štruktúrnú väzbu a znižuje ich súdržnosť;
- ▶ dlhodobým pôsobením mení konzistenciu zemín, znižuje ich súdržnosť a uhol vnútorného trenia (Otepka et al., 1983).

3. MONITORING ZOSUVNÉHO ÚZEMIA

Monitoring zosuvného územia bol v predchádzajúcom období vykonávaný krátkodobo, spravidla sa vykonával iba počas jednotlivých etáp prieskumov. Hlavné monitorovacie pozorovania boli vykonávané v čase spomínaného prieskumu (Otepka et al., 1983) začiatkom 80-tych rokov, kedy sa počas päť ročného obdobia (1979–1983) realizoval veľmi podrobný monitoring. Počas nasledovných rokov boli monitorovacie aktivity nepravidelné a rozptýlené v rôznych častiach územia, z dôvodu častých zmien v koncepcii vodného diela.

Zosuvné územie je pravidelne monitorované od roku 1997 v rámci projektu „Čiastkový monitorovací systém Geologické faktory, v subsystéme 01 Zosuvy a iné svahové deformácie“ (riešiteľom úlohy je Štátny geologický ústav Dionýza Štúra). Vzhľadom na veľký rozsah zosuvného územia (Hlohovec–Sereď) sa monitorovacie aktivity sústredili do vybratých oblastí, ktorých súčasťou je aj opisované územie.

V území sa realizujú pravidelné geodetické merania, merania hladiny podzemnej vody a merania pulzných elektromagnetických emisií (PEE). PEE merania sú predmetom dlhoročného výskumu kolektívu autorov Vybíral & Wagner (1999, 2004), ktorý prináša zaujímavé a cenné výsledky. V rámci posúdenia stability svahu je príspevok zameraný aj na zhodnotenie geodetických GNSS meraní za obdobie rokov 2010 až 2012.

Meranie horizontálnych a vertikálnych zmien povrchu územia geodetickými metódami patrí medzi základné monitorovacie aktivity, ktoré sa vykonávajú v rámci monitoringu svahových deformácií. Na Slovensku sa v súčasnosti využívajú najmä terestrické a družicové (GNSS) merania. Terestrické geodetické metódy zaznamenali v poslednom období výrazný progres v kvalite meracej techniky. Klasickou geodetickou technológiou založenou na priestorovej polárnej metóde možno dosiahnuť priestorovú bodovú presnosť až 1 mm, terestrickým laserovým skenovaním (TLS) cca 3 až 5 mm. V poslednom období sú terestrické metódy postupne nahradzované presnejšou družicovou technológiou GNSS (globálne navigačné satelitné systémy), ktorá sa v geodézii využíva na veľmi presné meranie priestorovej

polohy diskretných bodov (Leick, 1995; Hoffman-Wellenhop et al., 1997; Wagner et al., 2010). Pri jej aplikácii v zosuvných územiach nemôže úplne nahradiť klasické terestrické metódy. Avšak, ako každá metóda, tak aj GNSS merania majú svoje výhody, ale aj nedostatky. Príkladom, kedy sa GNSS merania nedajú aplikovať sú zalesnené časti zosuvného územia, kedy dochádza k strate (tieneniu) signálu.

Na účely monitorovania pohybovej aktivity so subcentimetrovou presnosť sa využívajú výlučne relatívne merania fáz nosných vĺn. Pri tomto type meraní sa určuje priestorový vektor (tvorený referenčným a sledovaným bodom), pričom meranie je založené na simultánnom meraní na oboch jeho koncoch (Hefty & Husár, 2003). Základnou metódou, ktorá nám umožňuje dosiahnuť požadovanú mm presnosť je statická metóda, pri ktorej sú prijímače na oboch koncoch základnice statické, nepohybujú sa. Merania prebiehajú súčasne na bode mimo zosuvného územia (referenčný bod) a na bodoch v zosuvnom území. Referenčný bod musí spĺňať určité kritéria, ako napríklad jeho umiestnenie mimo lokality v stabilnom podloží. Jeho stabilizácia by mala umožňovať presné opakované centrovanie prístroja na meraciu značku. Voľba počtu referenčných bodov závisí od požadovanej presnosti, veľkosti sledovaného územia a charakteru jeho pohybových tendencií (Ondrejka et al., 2011). V záujmovom území bol zvolený jeden referenčný bod s označením P-15 (Obr. 5a).

Po splnení základného predpokladu, ktorým bol netienený príjem signálov minimálne zo 4 družíc, na samotnú presnosť merania vplyva viacero faktorov, ako napríklad doba observácie, počet družíc zo synchronne prijímaným signálom, konfigurácia družíc, kvalita príjmu signálu a podobne. Okrem signálu z družíc amerického navigačného systému NAVSTAR GPS je v poslednom období možné prijímať signál i z družíc systému GLONASS, čím sa počet družíc výrazne zvýšil. Tento nárast počtu družíc umožňuje efektívnejšie eliminovať systematické efekty vplyvajúce na meranie (Ondrejka et al., 2011).

V opisovanom zosuvnom území boli použité prijímače umožňujúce prijímanie fáz nosných vĺn (L1 a L2; od firmy Trimble-5700 a 5800 a Rover R8 GNSS), vďaka ktorým bolo možné zabezpečiť požadovanú presnosť (niekoľko mm až cm v určení polohy bodu).

Sieť pozorovacích bodov, ktorá pokrýva rozsiahle zosuvné územie bola doplnená o ďalšie stabilizované body (ochranné pažnice pozorovacích vrtov a oceľové tyče – roxory). Osadenie a zabudovanie pažníc vrtov bolo dostačujúce na to, aby ich bolo možné využiť na merania polohových a výškových zmien. Vrty boli prispôbené tak, aby bolo na ne možné pripevniť GNSS anténu (Obr. 5b). Takto upravené a merané sú celkovo štyri inžinierskogeologické vrty (HSJ-37A, HSJ-38, HSJ-39 a HSV-40). Roxorové tyče s priemerom 3 cm rozširujúce danú sieť pozorovaných bodov (GPL-3, GPL-4) boli založené do hĺbky 1,8 m a zaliate betónovou zálievkou (Obr. 5c). GNSS anténa sa na ne pripevňuje prostredníctvom adaptéra (Obr. 5d). Situačné priestorové zobrazenie monitorovaných bodov spolu s výslednými veľkosťami vektorov za pozorované obdobie je na Obr. 6a.

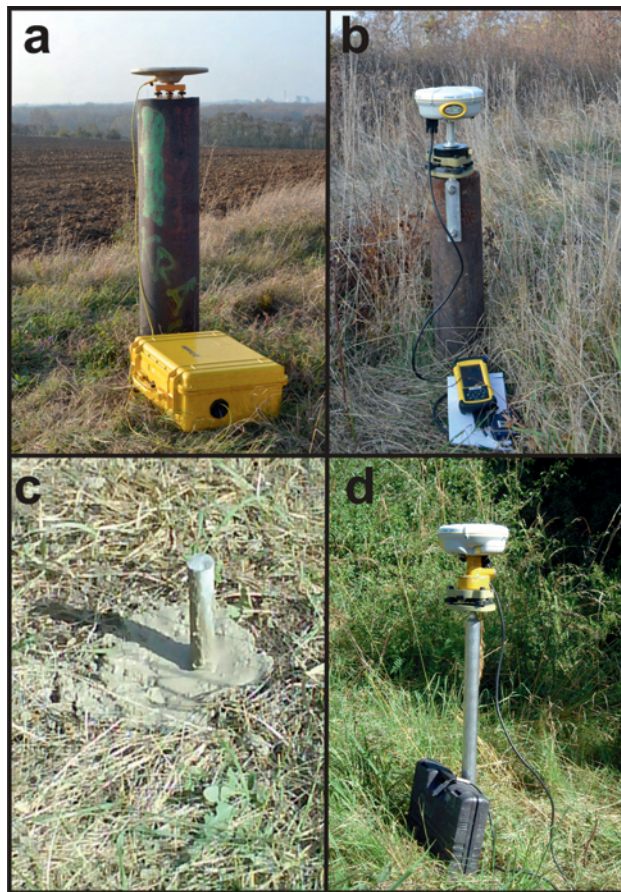
Geodetické GNSS merania sa v území začali realizovať začiatkom roku 2010. Od tohto roku až doteraz bolo celkovo zrealizovaných 6 meraní (prvé iniciálne tzv. nulté meranie a 5 etapových meraní). Minimálna doba observácie je 25 minút a závisí najmä

Tab. 1. Laboratórne stanovené fyzikálno-mechanické vlastnosti zemín vo vybraných vrtoch a ich zatriedenie podľa STN 73 1001 na základe medze tekutosti W_l [%], lokalita Bojničky (Otepka et al., 1983).

Tab. 1. Laboratory determined of soil properties in selected boreholes and their classification by STN 73 1001 based on plastic limit W_p [%], locality Bojničky (Otepka et al., 1983).

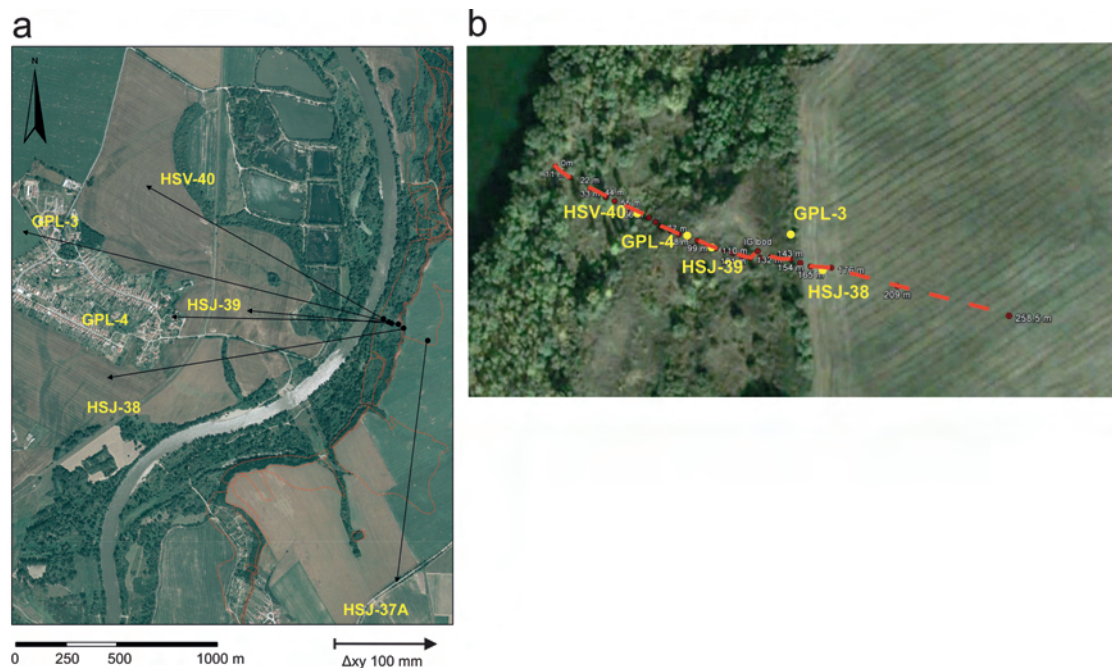
	hĺbka odberu vzorky [m] sampling depth	zatriedenie podľa STN 73 1001 soil classification by STN 73 1001	číslo pórovitosti e void ratio of soil	medza tekutosti W_l [%] liquid limit of soil	medza plasticity W_p [%] plastic limit of soil	číslo plasticity I_p plasticity index
HSJ-37A	2,9	F8-CH	0,9746	63,30	18,80	44,50
	8,9	F8-CV	0,9732	75,80	22,20	53,60
	12,9	F8-CH	0,9737	58,90	17,50	41,40
	14,9	F6-CI	0,9682	43,90	19,40	24,50
	17,9	F6-CI	0,9721	42,50	23,00	19,50
	20,9	F8-CH	0,9686	64,30	22,50	41,80
	23,9	F8-CV	0,9677	74,00	21,30	52,70
	26,9	F8-CH	0,9721	55,80	20,20	35,60
	29,9	F8-CH	0,9728	51,10	21,40	29,70
	32,9	F6-CI	0,967	42,30	17,10	25,20
HSJ-38	5,9	F8-CV	0,9726	79,10	24,80	54,30
	8,9	F8-CH	0,9725	55,80	20,40	35,40
	14,9	F8-CH	0,9683	58,30	18,80	39,50
	17,9	F6-CI	0,9736	39,70	20,00	19,70
	19,9	F8-CH	0,9707	60,70	16,40	44,30
	23,9	F6-CI	0,9721	48,90	17,40	31,50
	26,9	F8-CH	0,9697	69,20	21,90	47,30
HSJ-39	2,85	F5-MI	0,9733	46,50	18,60	27,90
	11,85	F8-CH	0,9728	50,20	19,50	30,70
	14,85	F6-CI	0,9704	46,60	14,50	32,10
	17,85	F6-CI	0,9677	42,80	16,40	26,40
	20,85	F8-CH	0,9706	53,20	17,80	35,40
HSV-40	1,7	F6-CI	0,9768	41,10	16,80	24,30
	12,9	F8-CH	0,9728	49,70	16,80	32,90

číslo konzistencie Ic consistency index	pórovitosť n [%] porosity	stupeň nasýtenia Sr [%] degree of soil saturation	prirodzená vlhkosť w _n [%] natural moisture content of soil	objemová hmotnosť [g.cm ⁻³] bulk density		merná hmotnosť [g.cm ⁻³] true specific soil density
				vlhkej zeminy wet soil	suchej zeminy dry soil	
0,95	38,30	93,10	21,10	2,04	1,69	2,74
1,06	36,30	91,60	19,10	2,07	1,74	2,73
0,97	37,00	86,90	18,70	2,04	1,72	2,73
1,37	30,40	64,40	10,30	2,10	1,90	2,73
1,60	34,80	57,20	11,30	1,96	1,76	2,70
1,26	30,80	72,40	11,80	2,11	1,89	2,73
1,13	30,00	90,40	14,20	2,18	1,91	2,73
1,06	34,90	94,40	18,40	2,12	1,79	2,75
1,10	35,80	90,00	18,30	2,08	1,76	2,74
1,15	29,30	86,00	13,20	2,16	1,91	2,70
1,10	35,50	95,20	19,20	2,10	1,76	2,73
1,06	35,40	90,00	18,20	2,07	1,75	2,71
1,13	30,50	84,30	13,60	2,15	1,89	2,72
1,14	36,90	80,20	17,30	2,00	1,71	2,71
1,00	33,10	90,70	16,50	2,12	1,82	2,72
1,05	34,90	79,60	15,70	2,05	1,77	2,72
1,14	32,00	89,60	15,50	2,14	1,85	2,72
0,99	36,50	88,60	18,80	2,05	1,72	2,71
1,06	35,80	86,50	17,80	2,05	1,74	2,71
0,96	32,80	86,70	15,80	2,08	1,80	2,68
1,20	30,00	69,90	11,10	2,10	1,89	2,70
1,06	33,00	85,00	15,50	2,09	1,81	2,70
0,73	42,10	86,90	23,30	1,94	1,57	2,71
0,95	35,70	89,70	18,30	2,07	1,75	2,72



Obr. 5. a) GNSS meranie na referenčnom bode P-15; b) geodetické meranie pomocou GPS jednotky Trimble 5800 osadenej na pažnici vrtu HSJ-38; c) zarazená a betónovou zálievkou zaliata roxorová tyč do hĺbky 1,8 m pod terénom, označenie GPL-3; d) geodetické meranie pomocou GPS jednotky Trimble 5800 osadenej na zarazenej roxorovej tyči s označením GPL-3 (foto: Petrýdesová, 2011).

Fig. 5. a) GNSS measurement of the referent point P-15; b) geodetic measurement using GPS unit Trimble 5800 assembled on the casing of the borehole HSJ-38; c) fixed steel bar founded in concrete in the depth of 1,8 m below terrain, označenie GPL-3; d) geodetic measurement using GPS unit Trimble 5800 assembled on the fixed steel bar GPL-3 (photos: Petrýdesová, 2011).



Obr. 6. Lokalizácia monitorovaných bodov v zosuvnom území Bojničky; a) výsledný vektor posunu Δxy (zmena medzi posledným realizovaným a nulovým meraním) jednotlivých bodov; b) lokalizácia ERT profilu.

Fig. 6. Observed objects localization in the Bojničky landslide area; a) vector results of displacement Δxy (the change of final and reference measurement) measured on "geodetic" point; b) localization of ERT profile.

Tab. 2. Zhodnotenie etapových a celkových polohových zmien (Δxy) zaznamenaných na monitorovaných bodoch za pozorované obdobie.
Tab. 2. Evaluation of partial and total position changes (Δxy) measured on monitoring points during the observation period.

označenie bodu boreholes	počet meraní number of measurements	etapové polohové zmeny Δxy [mm] partial position changes Δxy [mm]				celkové polohové zmeny Δxy [mm] total position changes Δxy [mm]			
		max (maximum)	min (minimum)	medián (median)	priem (average)	max (maximum)	min (minimum)	medián (median)	priem (average)
HSJ-37A	6	23,239	2,110	5,065	8,222	24,177	2,110	3,923	7,707
HSJ-38	6	28,818	3,515	23,040	18,406	29,833	2,027	8,828	14,631
HSJ-39	6	24,811	4,762	11,996	13,328	28,759	5,321	13,223	14,908
HSV-40	3	24,354	14,664	19,509	19,509	26,999	24,354	25,676	25,676
GPL-3	5	23,488	3,447	14,077	13,772	44,810	20,650	41,202	36,966
GPL-4	6	15,943	1,328	2,934	6,963	24,053	1,328	20,186	14,277

Tab. 3. Zhodnotenie etapových a celkových výškových zmien (Δz) zaznamenaných na monitorovaných bodoch za pozorované obdobie.
Tab. 3. Evaluation of partial and total elevation changes (Δz) measured on monitoring points during the observation period.

označenie bodu boreholes	počet meraní number of measurements	etapové výškové zmeny Δz [mm] partial elevation changes Δz [mm]				celkové výškové zmeny Δz [mm] total elevation changes Δz [mm]			
		max maximum	min minimum	medián median	priem average	max maximum	min minimum	medián median	priem average
HSJ-37A	6	79,810	2,880	21,400	31,002	93,270	59,640	71,870	73,422
HSJ-38	6	19,730	1,080	7,710	10,168	30,490	6,630	12,300	16,698
HSJ-39	6	54,630	2,160	29,520	26,158	96,950	52,470	65,140	67,324
HSV-40	3	91,640	43,550	67,595	67,595	91,640	48,090	69,865	69,865
GPL-3	5	22,590	4,850	10,120	11,920	20,240	7,200	13,450	13,585
GPL-4	6	40,070	4,590	11,880	20,384	32,900	0,720	0,720	11,596

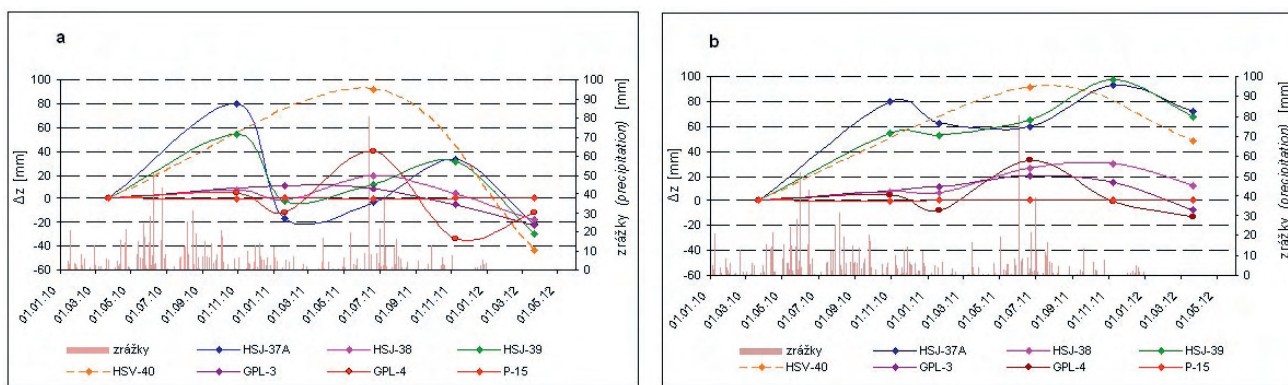
od požadovanej presnosti. Najlepšie výsledky sa dosahujú, keď sú súčasne merané všetky body geodetickej siete (referenčné aj pozorovacie), čo však nie je možné vždy dodržať. Preto merania na referenčnom bode prebiehajú kontinuálne počas celého merania a pozorované body sú merané po jednotlivých skupinách v závislosti od počtu dostupných GNSS prístrojov.

Namerané zmeny (polohové a výškové), ktoré boli vyhodnotené vždy od nultého merania, sú nazvané ako celkové zmeny. A naopak, zmeny (polohové a výškové), ktoré boli vyhodnotené vždy od predchádzajúceho merania, sú nazvané ako etapové zmeny. Namerané minimá, maximá a priemerné etapové aj celkové zmeny v polohe sú sumárne vyhodnotené v Tab. 2 a v Tab. 3 sú vyhodnotené minimá, maximá a priemerné etapové a celkové výškové zmeny pozorovaných bodov za sledované obdobie.

Priebeh etapových a celkových zmien nameraných na monitorovaných bodoch vo výške je znázornený na Obr. 7a,b a v polohe

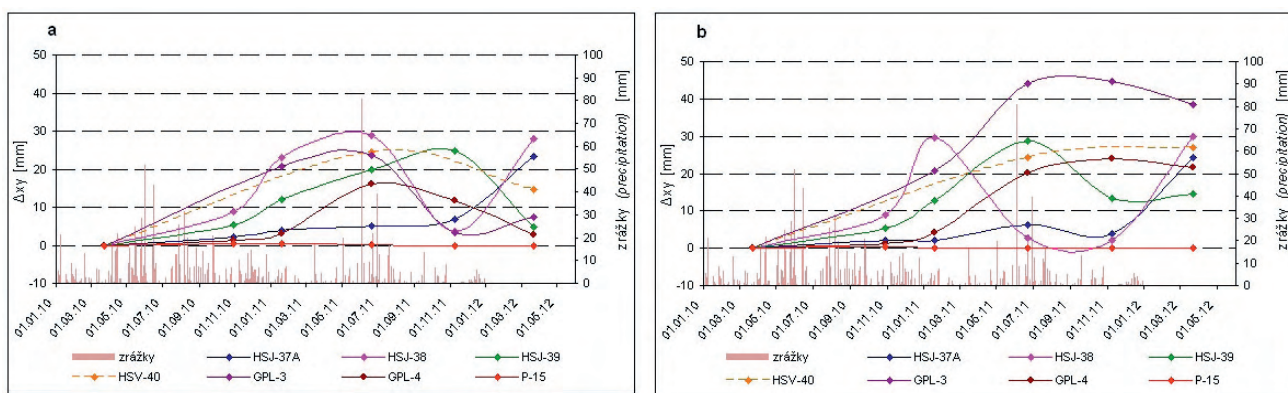
na Obr. 8a,b. Najvýraznejšie výškové zmeny boli namerané na vrte HJS-37A, ktorý sa nachádza tesne pod hlavnou odľučnou hranou zosuvu. Maximálna hodnota etapovej zmeny (Δz) 79,8 mm bola nameraná hneď v prvej etape merania (7 mesiacov od iniciálneho merania), pričom celková nameraná maximálna zmena Δz za celé pozorovacie obdobie 2010–2012 bola až 93,27 mm. Chyba prístroja vo výškových meraniach je 15–20 mm a v polohe 5–6 mm. Dosiahnutá deformácia vysoko prekračuje hodnotu chyby merania a teda nameranú zmenu možno považovať za pohyb. Polohové zmeny (Δxy ; etapové aj celkové) neboli tak výrazné ako výškové. Vrt HSJ-37A v polohovom smere vykázal naopak veľmi nízku pohybovú aktivitu oproti výškovým zmenám (24,17 mm – celkové; 23,23 mm – etapové). V období monitorovania sa práve v tomto vrte prejavili aj najvýraznejšie zmeny hladiny podzemnej vody (26,57 m).

Analogický priebeh vo výškových zmenách (celkových aj etapových) je pozorovaný na bode HSJ-39. Celková maximálna



Obr. 7. Grafické znázornenie výškových zmien (Δz) nameraných na jednotlivých pozorovacích bodoch počas pozorovaného obdobia: a) etapové zmeny; b) celkové zmeny.

Fig. 7. Schematic graphs of elevation changes (Δz) measured on selected boreholes during the observation period: a) periodic changes, b) total changes.



Obr. 8. Grafické znázornenie polohových zmien (Δxy) nameraných na jednotlivých pozorovacích bodoch počas pozorovaného obdobia: a) etapové zmeny; b) celkové zmeny.

Fig. 8. Schematic graphs of position changes (Δxy) measured on selected boreholes during the observation period: a) periodic changes; b) total changes.

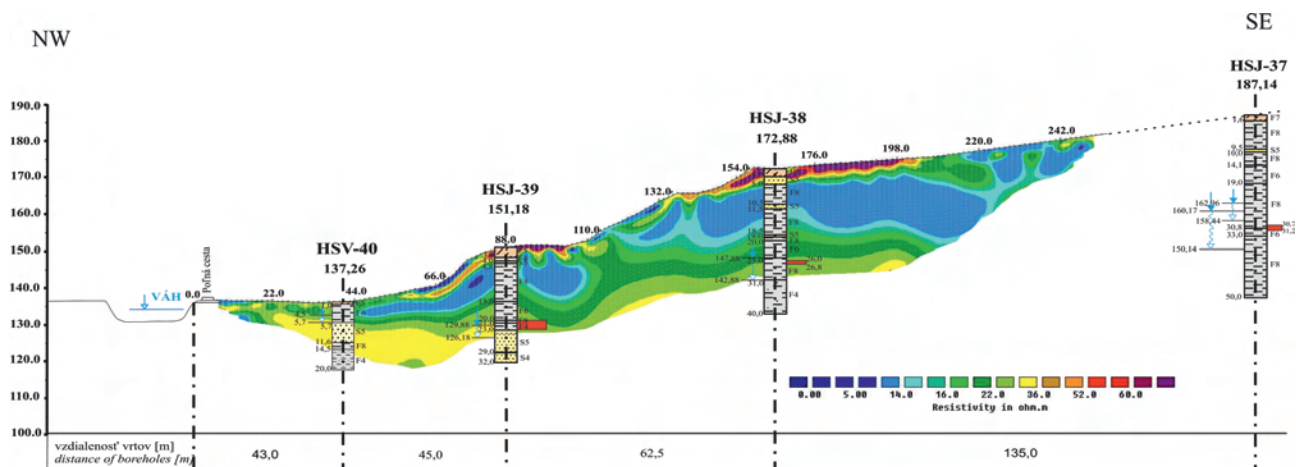
zmena v smere osi z (Δz) za pozorované obdobie bola o niečo vyššia (96,95 mm), ako bola zaznamenaná na bode HSJ-37A (93,27 mm). V celkových Δz zmenách oba body vykazujú oveľa vyššie hodnoty oproti nameraným hodnotám na ostatných bodoch. Výrazné vertikálne posuny môžu byť čiastočne ovplyvnené objemovými zmenami, najmä pri bodoch GPL-3 a GPL-4. Vybudovaný bod GPL-3 však vykazoval oproti ostatným pozorovaným bodom najnižšie hodnoty vertikálneho posunu (do 23 mm). Bod GPL-4 mal výraznejšie výškové zmeny ako GPL-3. Napriek jeho pomerne nízkym hodnotám vo výškových zmenách, k výraznejšej aktivite (v kladnom vertikálnom smere, Obr. 7a) došlo po extrémnych zrážkach v júni 2011 (80,6 mm), ktoré boli v území namerané (stanica Siladice). Po týchto extrémnych zrážkach bol zaznamenaný posun vo výške takmer u všetkých pozorovaných bodoch, okrem spomínaného bodu GPL-3. Rovnako, ako body HSJ-37A a HSJ-39, aj GPL-3 a GPL-4 vykazujú analogický priebeh, ale v celkových polohových zmenách (Obr. 8b). Po extrémnych zrážkach došlo rovnako, ako vo výškových zmenách aj k výrazným polohovým zmenám (Obr. 8a) na všetkých bodoch.

Vrt HSJ-38, ktorý je situovaný tesne nad druhou čiastkovou odlučnou hranou, vykazuje najmenšie etapové zmeny Δz (19,73 mm). Napriek skutočnosti, že po intenzívnych zrážkach

a topení sa snehovej pokrývky sa objavujú čerstvé zázrhy napravo pod spomenutým vrtom (Obr. 1), vrt nevykazuje výrazné zmeny Δz , ale naopak v polohe Δxy boli zaznamenané najväčšie etapové zmeny (28,81 mm) a druhé najväčšie celkové zmeny, čo je vidieť aj z grafického znázornenia výsledných vektorov (Obr. 6a). Znázornené vektory predstavujú zmenu medzi ostatným (21.3.2012) a nultým (23.3.2012) meraním.

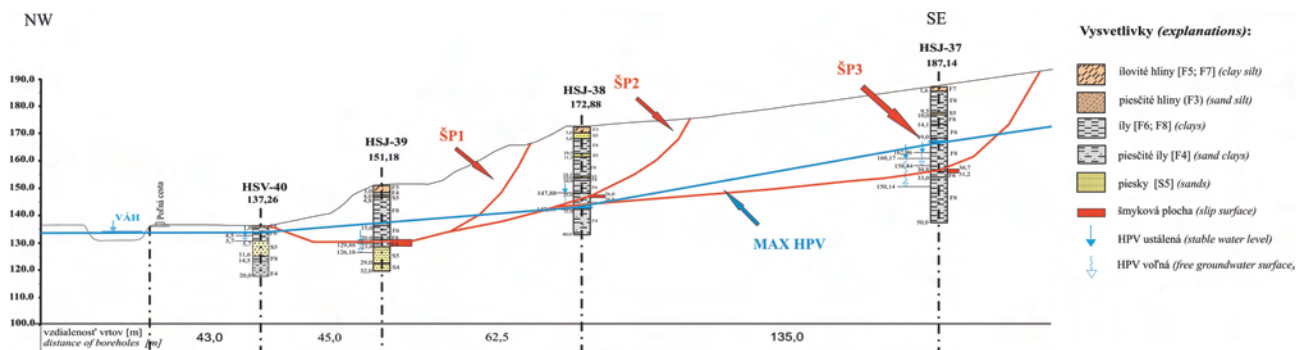
Vrt HSV-40 je situovaný tesne pod päťou zosuvu. Vzhľadom na jeho situovanie v zalesnenejšej časti zosuvu, výsledky z GNSS meraní sú ovplyvnené pomerne výraznou chybou, preto boli realizované iba 2 etapové merania.

Výsledky GNSS meraní poukazujú na zvýšenú aktivitu najmä v oblastiach odlučných hrán (HSJ-37A – vo výške a HSJ-38 – v polohe). Vektory posunu poukazujú prevažne na západný smer pohybu, v smere spádnicovej svahu. Väčšina vrtov, na ktorých bol zaznamenaný tento trend posunu je situovaných priamo v telese zosuvu, ktoré je charakteristické svojim výrazným sklonom. Vrt HSJ-37A je však situovaný v časti, v ktorej sklon svahu nie je tak výrazný. Výškové zmeny môžu súvisieť aj s neotektonickou aktivitou územia, ktorá bola a stále je predmetom výskumu viacerých autorov (Kováč & Baráth, 1996, Kováč et al., 1997, 1999, Vaas, 1998, Vaas & Perezslényi, 1998, Pristaš et al., 2000, Vojtko et al.,



Obr. 9. Výsledný geofyzikálny model ERT merania preložený litológiou z vrtnov.

Fig. 9. Geophysical ERT model overlapped by boreholes' lithology.



Obr. 10. Schematický profil zosuvného svahu Bojničky s vyznačením prieskumom zistenými šmykovými plochami a maximálnou úrovňou hladiny podzemnej vody.

Fig 10. Schematic profile of Bojničky landslide with survey detected slip surfaces and maximum ground water table level.

2008). Existencia vážskeho zlomu je problematická a ani pri všetkých doteraz realizovaných prieskumných prácach pre plánované vodné dielo v území, zlom nebol zistený (Mocik et al., 2008).

4. ELEKTRICKÁ ODPOROVÁ TOMOGRAFIA

Telesá svahových deformácií sú veľmi heterogénne a ich interpretácia iba na základe vrtných dát – bodových údajov by bola subjektívna, preto sme v území vykonali geofyzikálne meranie pomocou elektrickej odporovej tomografie (ERT).

Technika ERT je pomerne často využívaná v inžinierskej geológii, hydrogeológii a v environmentálnej problematike. V poslednej dekáde nastal veľký rozvoj vo vývoji geofyzikálnych aparátúr a v 2D a 3D inverzných softvéroch, čo výrazne zvýšilo atraktivitu používania odporovej tomografie. Veľa geofyzikov ukázalo, že použitím veľkého množstva nameraných dát je možné relatívne presne rekonštruovať horninové prostredie pomocou zobrazenia v odporovom reze (Daily & Owen, 1991; Park & Van, 1991; Shima, 1992; Li & Oldenburg, 1992; Sasaki, 1994; Loke & Barker, 1995, 1996; LaBrecque et al., 1996). 2D elektrická tomografia sa obvykle vykonáva pomocou veľkého množstva

elektrod, 25 a viac, pripojených na viacžilový kábel (Griffiths & Barker, 1993). V teórii dáva 3D tomografický prieskum presnejšie interpretačné modely, avšak v súčasnej dobe je 2D tomografický prieskum lepším ekonomickým riešením medzi presnosťou modelu a nižšími cenovými nákladmi (Dahlin, 1996).

Vzájomná vzdialenosť elektrod sa určuje v závislosti na detailnosti prieskumu a požadovanom hĺbkovom dosahu. V našom prípade bol použitý systém elektrodového usporiadania typu dipól-dipól s krokom medzi elektrodami 5.5 m. Na interpretáciu nameraných zdanlivých odporov bol použitý program RES2DINV (2-D inverzia). Ide o typickú 2D úlohu, pri ktorej sa predpokladá, že merné odpory sa menia iba v smere profilu (os x) a s hĺbkou (os z), zatiaľ čo kolmo na profil (v smere osi y) zostávajú v podstate konštantné. Inverzia nám umožňuje namerané dáta transformovať na súbor hodnôt skutočného merného elektrického odporu a na ich základe získať obraz o reálnej štruktúre vyšetřovaného horninového prostredia.

Jednotlivé meracie elektrody na profile ERT boli pozične zamerané (Obr. 6b), a ich skutočná poloha a výška vstupovala priamo do výpočtu inverzie, to umožnilo opravu o topografiu a obmedziť chybu merania, ktorá vzniká nepresnosťou situovania meracích elektrod na minimum.

Tab. 4. Charakteristika vstupných parametrov jednotlivých vrstiev zemín použitých v stabilitnom výpočte.

Tab. 4. Characteristic of input soil parameters used in stability analysis.

Číslo vrstvy number of layer	Charakteristika zeminy a zatriedenie podľa ČSN 73 1001 soil characteristic and classification by STN 73 1001	γ [kN.m ⁻³]	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1.	Ílovitá hlina clayey silt; F7-MH	21,0	15	4
2.	Prachovitý íl, tuhý až pevný silty clay, stiff to very stiff; F8-CH	20,5	18	3
3.	Ílovitá hlina, pevná až tvrdá clayey silt, very stiff to hard; F6-CI	21,0	17	20
4.	Hlina piesčitá, mäkká sandy silt, soft; F3-MS	18,0	24	8
5.	Prachovitý piesok silty sand; S5-SC	18,5	26	4
6.	Prachovitý íl, tuhý silty clay, stiff; F8-CH	20,5	13	6
7.	Hlina ílovitá, tuhá clayey silt, stiff; F5-MI	20,0	19	8
8.	Prachovitý íl, pevný silty clay, very stiff; F8-CH	20,5	11	1
9.	Prachovitý íl, pevný silty clay, very stiff; F6-CI	21,0	17	12
10.	Piesčitý íl, mäkký sandy clay, soft; F4-CS	18,5	22	10
11.	Piesčitý štrk sandy gravel; G3-GF	19,0	33	0
12.	Íl jemne piesčitý, tuhý sandy clay, stiff; F6-CI	21,0	17	8

Tab. 5. Výsledky stupňa stability svahu na jednotlivých šmykových plochách.

Tab. 5. Stability analysis results of selected slip surfaces.

HPV groundwater table level	ŠP1 slip surface1	ŠP2 slip surface2	ŠP3 slip surface3
suchý stav dry conditions	1,05	1,07	1,29
max HPV maximum level of groundwater	0,91	0,99	1,

Výsledný model merného elektrického odporu bol preložený litológiou z vrtov (Obr. 9) a doplnil chýbajúce údaje najmä z transportačnej časti zosuvov.

Z modelu je možné definovať jednotlivé vrstvy ílu a piesku, ktoré sa v horninovom prostredí tvoriace zosuvné teleso pravidelne striedajú. Povrchové vrstvy kvartérnych hĺn dosahovali najvyššie hodnoty merného elektrického odporu. Vysokoplastickým ílom skupine F8 zodpovedajú namerané hodnoty od 0 do 15 Ohm·m. Pre íly s nižšími hodnotami plasticity sú to o niečo vyššie hodnoty. Piesky zreteľné najmä v aluviálnej nive a v hlbších častiach v čele zosuvu sú charakterizované odporom v rozmedzí 29–36 Ohm·m. Napriek pomerne presnému určeniu jednotlivých vrstiev, bolo nutné však svah zgeneralizovať, nakoľko použitý stabilitný program (Geo5 Stabilita Svahu) nedokáže počítať s objektmi tvaru šošovky.

5. STABILITNÉ VÝPOČTY

Pri zostavovaní geotechnického modelu svahu je potrebné podrobne poznať jeho geometriu, šmykové parametre všetkých

litologických vrstiev tvoriacich svah a hydrogeologické pomery (predovšetkým úroveň hladiny podzemnej vody). Ako už bolo spomenuté vyššie, zosuvné územie je budované dvoma základnými typmi zemín, ktoré sa nepravidelne striedajú v polohách s rôznymi hrúbkami, a to:

- ▶ súdržné zeminy: íl, ílovitá hlina, ílovitopiesčitá hlina až piesčitá hlina;
- ▶ nesúdržné zeminy: piesky, hlinito-ílované piesky.

Matematický model bol zostavený na základe litológie zistenej z piatich inžinierskogeologických vrtov realizovaných v 80-tych rokoch (HSJ-37A, HSJ-38, HSJ-39 a HSV-49) a geofyzikálneho ERT merania vykonaného v januári 2011.

Celková dĺžka profilu je 285,5 m a prevýšenie svahu je 50 m (Obr. 10). Presné charakteristiky fyzikálno-mechanických vlastností použité (vstupujúce) do stabilitného výpočtu sú uvedené v Tab. 4. Geotechnické vlastnosti zemín boli prevzaté z predchádzajúcich prieskumov (Otepka et al., 1983) a vrstvy, z ktorých neboli odobrané vzorky, boli charakterizované tabuľkovými hodnotami podľa STN 73 1001. V prípade, že bolo z jednej vrstvy odobraných a laboratórne spracovaných viac vzoriek, tak sa do

úvahy brali tie vlastnosti zemín, ktoré sú zo stabilného hľadiska nepriaznivejšie.

Výpočty boli vykonané na prieskumom zistených troch šmykových plochách (Obr. 10) v programe GEO 5.2 Stabilita Svahu. Aplikovaný bol výpočet podľa Sarmovej metódy, ktorá je v programe implementovaná. Metóda umožňuje počítať stabilitu svahu na polygonálnych šmykových plochách. Uvažovalo sa so suchým svahom (bez vplyvu podzemnej vody) a s maximálnou úrovňou hladiny podzemnej vody, zistenou počas predchádzajúcich prieskumov. Maximálna hĺbka šmykovej plochy je 31,2 m (HSJ-37A). Výsledky stabilných výpočtov na každej šmykovej ploche sú uvedené v Tab. 5.

Stabilita svahu počítaná pre šmykové plochy 1 a 2, bez uvažovania vplyvu vody, sa pohybuje na úrovni hraničnej hodnoty stupňa stability FS 1,1 pre poľnohospodársky využívanú pôdu, poľa, lesy a pasienky. Je to dané pomerne výrazným sklonom svahu v centrálnej časti telesa zosuvu. Pri maximálnej úrovni hladiny podzemnej vody stupeň stability klesol pod hodnotu 1. Nestabilita svahu v tejto časti je zrejma už z viditeľných zátrhov (Obr. 1), ktoré vznikajú najmä po intenzívnych zrážkach a jarnom topení sa snehovej pokrývky, kedy dochádza k nasýteniu telesa zosuvu vodou, čo dokumentujú aj výrazné polohové zmeny zaznamenané na bode HSJ-38 28,8 mm (zmena za 5 mesiacov – 3. etapové meranie). Stabilita počítaná na 3. šmykovej ploche bez uvažovania vplyvu podzemnej vody je 1,3. Pri maximálnej úrovni HPV je o niečo nižšia, ale napriek tomu pri uvažovanej hranici FS 1,1 je stále svah považovaný za potenciálne stabilný.

6. ZÁVER

Pri zostavovaní geotechnického modelu vstupujúceho do stabilných výpočtov je dôležité nastavenie okrajových podmienok. Okrem geometrie svahu a hydrogeologických pomerov je nevyhnutné poznať samotnú geologickú stavbu daného svahu, na základe ktorej sa priradia šmykové parametre jednotlivým vrstvám. Vo všeobecnosti sa geologické pomery svahu zisťujú z vrtov realizovaných v danom profile, ktoré však predstavujú len bodové údaje. Spájanie vrstiev na základe bodových údajov vnáša pri tvorbe geotechnického modelu značnú subjektivitu, ktorá do veľkej miery závisí najmä od skúseností zodpovedného riešiteľa. Táto subjektivita môže byť do istej miery odstránená pomocou elektrickej odporovej tomografie, kedy je možné relatívne presne rekonštruovať horninové prostredie pomocou zobrazenia v odporovom reze.

Výsledky výpočtov na takýmto spôsobom zostrojenom matematickom modeli poukazujú na potenciálnu nestabilitu hodnoteného svahu, najmä jeho centrálnej časti, ktorá je charakteristická strmým sklonom svahu. Jedným z ďalších na stabilitu negatívne vplývajúcich faktorov je samotná litologická stavba horninového masívu. Striedanie vysokoplastických nepriepustných ílov a priepustných polôh pieskov vytvára štruktúru vhodnú na rozvoj svahových deformácií. V dôsledku nasycovania svahu vodou dochádza u ílov k znižovaniu parametrov šmykovej pevnosti a tým pádom k znižovaniu samotnej stability svahu. Na retrográdny vývoj v centrálnej časti poukazujú aj z GNSS meraní vyhodnotené vektory posunu. Z geodetických meraní je zrejma nestabilita

v odlučných častiach zosuvu. Vo vrte HSJ-37A, ktorý je situovaný pod hlavnou odlučnou hranou boli okrem výrazných výškových zmien zaznamenané aj výrazné rozkvyvy HPV. Nestabilita svahu je dokumentovaná aj devastáciou a zmenšovaním poľnohospodársky využívannej pôdy. V súčasnosti opisovaný zosuv neohrozuje žiadne stavebné ani iné objekty, a preto jeho sanácia nie je potrebná. Vzhľadom na to, že v území sa naďalej uvažuje s výstavbou vodného diela, je nevyhnuté svah naďalej monitorovať a v prípade jeho realizácie bude nutné svah zabezpečiť vhodnými technickými opatreniami. Hustejšia periodicita meraní a korelácia viacerých metód napomáha k presnejšiemu vyhodnoteniu údajov a následné analýzy príčin vzniku zosuvov umožňujú navrhnúť účinnejšie sanačné opatrenia. Geodetické merania poukázali na zjavnú aktivitu územia z hľadiska povrchových pohybov, ktorá bola potvrdená stabilnými výpočtami.

Podakovanie: Príspevok vznikol za spolufinancovania grantov VEGA č. 1/0910/11, č. 1/0747/11 a APVV-0330-10.

Literatúra

- Bednarik M., Yilmaz I. & Marschalko M., 2012: Landslide hazard and risk assessment: a case study from the Hlohovec – Sered' landslide area in south-west Slovakia. *Natural Hazards*, 64, 1, 547–575.
- Daily W. & Owen E., 1991: Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics* 56, 8, 1228–1235.
- Dahlin T., 1996: 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break* 14, 7, 275–283.
- Griffiths D.H. & Barker R.D., 1993: Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics* 29, 3-4, 211-226.
- Hefty J. & Husár L., 2003: Družicová geodézia, Globálny polohový systém. Bratislava, Slovenská Technická Univerzita, 188 p.
- Hoffman-Wellenhopf B., Lichtenegger H. & Collins J., 1997: GPS – Theory and practice. 1st edition: Springer-Verlag, Wien/New York, 389 p.
- Holzer R., Laho M., Wagner P. & Bednarik M., 2009: Inžinierskogeologický atlas hornín Slovenska. ŠGÚDŠ Bratislava, 532 p.
- Klukanová A., Iglárová L., Wagner P., Ondrášik M., Liščák P., Matys M., Vlčko J., Kováčiková M., Hrašna M., Bodiš D., Moczo P., Smolárová H., Antal J., Cipciar A., Dananaj I., Durmeková T., Frankovská J., Helma J., Jelínek R., Maas P., Matejček A., Labák P., Paudits P., Petro L., Polaščinová E., Rozimant K., Scherer S., Slaninka I. & Vanko J., 2001: Čiastkový monitorovací systém, geologických faktorov životného prostredia SR, 1993 – 2000, Záverečná správa, GSSR, Bratislava, 360 p.
- Kováč M. & Baráth I., 1996: Tectonicko-sedimentárny vývoj alpsko-panónskej styčnej zóny počas miocénu. *Mineralia Slovaca*, 28, 1, 1-11.
- Kováč M., Baráth I. & Nagymarosy A., 1997: The Miocene collaps of the Alpine-Carpathian-Pannonian junction - an overview. *Acta Geologica Hungarica*, 40, 3, 241-264.
- Kováč M., Holcová K. & Nagymarosy A., 1999: Paleogeography, paleobathymetry and relative sea-level changes in the Danube Basin and adjacent areas. *Geologica Carpathica*, 50, 4, 325-338.
- LaBrecque D.J., Miletto M., Daily W., Ramirez A. & Owen E., 1996: The effects of 'Occam' inversion of resistivity tomography data. *Geophysics* 61, 2, 538–548.
- Leick A., 1995: GPS Satellite Surveying. 2nd edition: Wiley, New York, 584 p.
- Li Y. & Oldenburg D.W., 1992: Approximate inverse mapping in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International* 109, 2, 343–362.

- Loke M.H. & Barker R.D., 1995: Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, 6, 1682–1690.
- Loke M.H. & Barker R.D., 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 1, 131–152.
- Matula M. & Pašek J., 1986: Regionálna inžinierska geológia ČSSR. Alfa Bratislava, 295 p.
- Mazúr E. & Lukniš M., 1986: Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. In: Zaňko M. (Ed.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002: 1. vyd. Bratislava, Ministerstvo Životného prostredia SR; Banská Bystrica: Slovenska agentúra životného prostredia, 344 p.
- Mocik A., Mociková I., Bednarik M., Kovacs T., Liščák P., Molnárová A., Mutkovič A., Ripka J., Ružičková J., Straka P., Tothová L., Váradiová D., Zaliberová M., Bereš J., Senko M. & Mocik M., 2008: Vodné dielo Hlohovec–Sereď, správa o hodnotení vplyvov na životné prostredie podľa zákona NR SR č. 24/2006 Zb. z., Pedohy, Bratislava, 223 p.
- Nemčok A., 1982: Zosuvy v Slovenských Karpatoch. Veda Bratislava, 320 p.
- Ondrejka P., Liščák P., Paudits P. & Papčo J., 2011: Use of GNSS technology in engineering geology in Slovakia. *Mineralia Slovaca* 43, 2, 111–120.
- Otepka J., Menzelová O., Bohyník J., Mesko M., Čubříková E., Roháčiková A., Škripeková L., Novotný P., Čellár S., Abelovič J., Černanský J., Kúdeľ P. & Bláha P., 1983: Záverečná správa z orientačného IG prieskumu Hlohovec–Sereď, prieskum a sanácia zosuvov, IGHP Bratislava, 120 p.
- Park S.K. & Van G.P., 1991: Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 7, 951–960.
- Pristaš J., Elečko M., Maglay J., Fordinál K., Šimon L., Gross P., Polák M., Havrila M., Ivanička J., Határ J., Vozár J., Tkáčová H., Tkáč J., Liščák P., Jánová V., Švasta J., Remšík A., Žáková E & Töröková I., 2000: Vysvetlivky ku geologickej mape Podunajskej nížiny – Nitrianskej pahorkatiny 1 : 50 000. Vydavateľstvo Dionýza Štúra, Bratislava, 250 p.
- Shima H., 1992: 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data. *Geophysics* 57, 10, 1270–1281.
- Sasaki Y., 1994: 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics* 59, 12, 1839–1848.
- Vass D., 1998: Neogene geodynamic development of the Carpathian arc and associated basins. In: Rakús M. (Ed.): Geodynamic development of the Western Carpathians. Geologický ústav Dionýza Štúra, Dionýz Štúr Publishers, Bratislava, 155–188.
- Vass D. & Pereszlényi M., 1998: Assymmetric lithospheric stretching in Danube Basin. *Slovak Geological Magazine*, 4, 61–74.
- Vojtko R., Hók J., Kováč M., Sliva L., Joniak P. & Šujan M., 2008: Pliocene to Quaternary stress field change in the western part of the Central Western Carpathians (Slovakia). *Geological Quarterly* 52, 1, 19–30.
- Vybíral V. & Wagner P., 1999: Príspevok metódy PEE k posúdeniu stability svahov v priestore vodného diela Sereď–Hlohovec. In: Zborník zo 4. geotechnickej konferencie Prognóza a verifikácia v geotechnickom inžinierstve, STU Bratislava. 227–231.
- Vybíral V. & Wagner P., 2004: Hodnotenie stability územia na základe výsledkov merania poľa PEE. In: Klukanová A. & Frankovská J. (Eds.): Zborník vedeckých prác Geológia a životné prostredie, ŠGÚDŠ Bratislava, 71–75.
- Wagner P., Iglárová L., Petro L. & Scherer S., 2002: Monitorovanie zosuvov a iných svahových deformácií. Geologické práce, Správy 106, ŠGÚDŠ, Bratislava, 21–42.
- Wagner P., Ondrejka P., Iglárová L. & Fraštia M., 2010: Aktuálne trendy v monitorovaní svahových pohybov. *Mineralia Slovaca* 42, 2, 229–240.
- STN 73 1001 – Geotechnické konštrukcie. Zakladanie stavieb, 2010.
- <http://www.vvb.sk/cms/index.php?page=vd-sered---hlohovec>

Summary: The long-term monitoring of landslide areas provides information that contributes to knowledge and understanding of causation and mechanism of landslide processes. Also helps to prognosis of future landslide progress and gives valuable information on the effectiveness of implemented remedial measurements (Wagner et al., 2002). The selected landslide area Hlohovec – Sereď is generally well-known to the planned water work construction (www.vvb.sk, 2012). In connection with this perspective construction comes to the fore the question of stability problems of landslide areas of the western boundary of Nitrianska pahorkatina Upland. The area has been selected to critical sections, which shows considerable instability. One of these sections is the locality near by village of Bojničky (Fig. 1). This locality is periodically monitored since 1997 within the project of Ministry of Environment “*Partial Monitoring System of Geological Factors of Environment in the Slovak Republic*” solved by the State geological institute of Dionýz Štúr in Bratislava.

In this selected profile, there were realized the geophysical ERT measurements. In the final model of resistivity (Fig.9) we could define the depth of the slip surfaces and the layers of clay and sand were clearly given. Based on this obtained data, generalized geotechnical model was constructed. Stability analysis was calculated for three polygonal slip surfaces (Fig. 10) by Sarm’ method using geotechnical software Geo5.2. The calculation process was carried out for dry slope (without of water level) and for maximum of ground water table level. Final factor of safety (Tab. 5) for the all slip surfaces was less than 1.5, but for the agricultural farmland, fields and pastured is the FS limit less than 1.1. In that case the factor of safety calculated for the third slip surface (for dry and for wet slope) is above the threshold limit 1.1 and the slope is considered for potentially stable. The final factor of safety of other calculated slip surfaces was less than mention limit. That main instability is due to the relatively steepness of slope in the central part of landslide. The body of landslide also consists of sandy and clayey layers with high plasticity. When the slope is saturated, the values of shearing parameters are decreasing and slope becomes unstable. After the extreme rainfall and melting of snow, the visible cracks were created (Fig. 1). The slope instability was confirmed by geodetic GNSS measurements. These measurements were carried out during two years period and results (Fig. 7 and Fig. 8) suggest on increased activity of landslide’s scarp zones (boreholes: HSJ-37A – elevation changes and HSJ-38 – position changes). Shift vector has west direction (Fig. 6), in slope sliding direction – retrogressive landslide evolution. This trend has been observed on the most of monitored boreholes which are located in the central part of landslide body characterized by its steep slope gradient. Though the borehole HSJ-37A is situated in that part of landslide which is not so steep. Elevation changes can to a certain related to the Neotectonic activity of area which was and still is the focus of research of several authors (Kováč & Baráth, 1996, Kováč et al., 1997, 1999, Vaas, 1998, Vaas & Pereszlényi, 1998, in Pristaš et al., 2000; Vojtko et al., 2008).

Although in the present, the landslide is jeopardizing any objects or some engineering construction; if the water work is still planned it is necessary to continue with monitoring. An extensive building intervention due to planned water works may cause even greater instability. In the event that the construction of the water work will be appropriately selected technical measures, so the water work will significantly contribute to improving the current stability of rock mass.