



**SRT A ERT PRI RIEŠENÍ PROBLÉMU DEFORMÁCIÍ SVAHU,
PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA KRAĽOVANY (SLOVENSKO)
SRT AND ERT IN SOLVING THE PROBLEM OF SLOPE DEFORMATIONS,
CASE STUDY KRAĽOVANY (SLOVAKIA)**

Jana Lahučká¹, René Putiška², Martin Bednarik³, Bibiana Brixová⁴

Abstrakt

Tento príspevok sa zameriava na aplikáciu metód seizmickej refrakčnej tomografie (SRT) a elektrickej odporovej tomografie (ERT) pri posudzovaní svahových deformácií na príklade zosuvu v oblasti Kraľovany (Slovensko). Svahové deformácie v tomto regióne predstavujú vážnu hrozbu pre infraštruktúru a bezpečnosť, pričom ich aktivizácia bola podporená stavebnými prácami spojenými s výstavbou diaľnice. Geofyzikálne merania sa realizovali na dvoch profiloch, čím sa doplnili inklinometrické údaje z vrtov. ERT a SRT umožnili identifikovať šmykové plochy a litologické rozhrania medzi deluviálnymi sedimentmi a podložnými kriedovými slieňovcami, čím prispeli k podrobnejšiemu pochopeniu štruktúry a dynamiky zosuvného komplexu. Výsledky z ERT a SRT korelujú s vrtnými údajmi a odhaľujú komplexný systém šmykových plôch s rozdielnou hĺbkou, čo poukazuje na nutnosť ďalšieho monitoringu a stabilizačných opatrení na zabezpečenie bezpečnosti v postihnutej oblasti.

Abstract

This contribution focuses on the application of seismic refraction tomography (SRT) and electrical resistivity tomography (ERT) and methods in the assessment of slope deformations on the example of a landslide in the Kraľovany area (Slovakia). Slope deformations in this region represent a serious threat to infrastructure and safety, while their activation was supported by construction works connected with the construction of the highway. Geophysical measurements were carried out on two profiles, which supplemented the inclinometric data from the wells. ERT and SRT made it possible to identify shear surfaces and lithological interfaces between deluvial sediments and the underlying Cretaceous marls, thereby contributing to a more detailed understanding of the structure and dynamics of the landslide complex. The

results from ERT and SRT correlate with drilling data and reveal a complex system of shear surfaces with different depths, which points to the need for further monitoring and stabilization measures to ensure safety in the affected area.

Klíčová slova

ERT (elektrická odporová tomografia), SRT (seizmická refrakčná tomografia), zosuvy, monitorovanie stability svahov, Kral'ovany

Keywords

ERT (electrical resistivity tomography), SRT (seismic refraction tomography), landslides, slope stability monitoring, Kral'ovany

Úvod

Cieľom tohto príspevku je ukázať na konkrétnom príklade možnosti zapojenia geofyzikálnych meraní do komplexného systému posudzovania a monitoringu svahových deformácií. Téma svahových deformácií je veľmi aktuálna. Svahové deformácie ohrozujú majetky obyvateľov, poľnohospodársku pôdu, cestné komunikácie a železnice, v najhorších prípadoch môžu končiť obeťami na životoch. Preto je nevyhnutné tejto téme venovať pozornosť s dôrazom na včasné odhalenie mapovaním a následným monitoringom ich aktivity a predchádzanie havarijných stavov. Každý svah je z dlhodobého hľadiska nestabilný a vplyvom endogénnych a exogénnych faktorov môže časom podľahnúť gravitačným silám. Podľa správy Ministerstva hospodárstva SR z roku 2018, viac ako 5 % územia krajiny Slovenskej republiky je postihnutých svahovými deformáciami. Aktivizácia svahových pohybov je podmienená viacerými faktormi ako sú morfológia terénu, geologická stavba, klimatické, hydrologické a hydrogeologické pomery, seizmicita územia, vegetačný pokryv a v neposlednom rade antropogénna činnosť. Práve antropogénne vplyvy môžu byť spúšťacím faktorom narušenia svahovej stability. Takýmto prípadom je aj negatívny vplyv stavebných prác, realizovaných v rámci plánovanej výstavby diaľnice, na stabilitné pomery svahov na ľavom brehu rieky Váh oproti intravilánu obce Kral'ovany. Napriek viacerým inžinierskogeologickým prieskumom a viacerým etapám geotechnického monitoringu, sa po antropogénnych zásahoch do územia v kombinácii s nepriaznivými klimatickými podmienkami, aktivizovali lokálne časti zosuvných území. Táto situácia viedla k zmene plánovanej trasy diaľnice a ukončeniu výstavby v tomto úseku. V súčasnosti sú v postihnutej oblasti aktívne zosuvy s plytkou šmykovou plochou, najmä na úpätí svahu pozdĺž rieky Váh a v terasovej hrane vo východnej časti územia. Menej zreteľné sú plytké aktívne zosuvné formy lokalizované v odlesnenej časti svahu nad prístupovou cestou, u ktorých sa nedá vylúčiť aj ich hlbší priebeh s východmi šmykových plôch až pri úpätí svahu. Ako uvádza Šimeková et al. (2018), zabezpečenie možnosti ďalšieho využívania územia ako i udržanie zjazdnosti vybudovanej prístupovej cesty si vyžaduje zabezpečenie stability svahov. Pre stabilizáciu časti poľnej cesty boli realizované sanačné opatrenia (obr. 1), tie však nezabezpečujú celkovú stabilitu územia. Preto bol v postihnutom území postupne overený stav už vybudovaného monitorovacieho systému, prebehli režimové pozorovania a boli realizované geofyzikálne merania, ktorých cieľom bolo overiť priebeh šmykových plôch. Geofyzikálne merania umožňujú zachytiť kontakt medzi vrstvami, ktoré majú odlišné fyzikálne vlastnosti. V prípade svahových deformácií fyzikálne vlastnosti odrážajú mieru porušenia hornín čo umožňuje odlíšiť teleso zosuvu od neporušeného podlažia. Ako vo svojej práci uvádza napr. Bláha (2017), geofyzikálne metódy poskytujú rôzne údaje po-

trebné pre posudzovanie svahových deformácií, vrátane určenia časového vývoja zosuvu alebo pri určovaní vnútorného zloženia zosuvných hmôt a reliéfu povrchu skalného podložia (Uhlemann et al., 2016; Jongmans a Grambois, 2007). Primárne sa však využívajú na stanovenie priebehu šmykovej plochy a vymedzenie telesa zosuvu (Dostál et al., 2014; Olabode et al., 2022).



Obr. 1 Stabilizácia časti poľnej cesty vertikálnou vystuženou konštrukciou Erdox Terra

Merania s cieľom vymedziť teleso zosuvu je potrebné realizovať nielen na samotnom zosuve ale aj v stabilnej oblasti mimo zosuvu. Veľakrát však exponovaný terén, v ktorom svahová deformácia vzniká neumožňuje technicky zabezpečiť splnenie tejto podmienky. Na tento problém sme narazili i v prípade Kaľovianskeho zosuvu. Hlavným cieľom geofyzikálnych meraní bolo prostredníctvom seizmickej refrakčnej tomografie (SRT) a elektrickej odporovej tomografie (ERT) spresniť bodovú informáciu z inklinometrických meraní po celej dĺžky profilu, zistiť priebeh litologických rozhraní a overiť priebeh šmykových plôch čiastkových zosuvov tvoriacich tento zosuvný komplex.

Charakteristika posudzovanej oblasti

Posudzované územie Kraľovianskeho zosuvu leží v Žilinskom kraji, okrese Dolný Kubín, v katastrálnom území obce Kraľovany (obr. 2). Akumulačná časť zosuvu sa nachádza v bezprostrednej blízkosti ľavého brehu rieky Váh, oproti intravilánu obce Kraľovany.

Z geomorfologického hľadiska patrí posudzovaný úsek do Fatransko-tatranskej oblasti, celku Veľká Fatra. V dôsledku vývoja svahových deformácií je územie morfológicky členité so zvlneným a stupňovitým reliéfom. Plochejšie úseky reprezentujú akumulčné valy a poklesnuté časti telies svahových deformácií. Strmší sklon terénu majú odlučné oblasti a tiež úpätie svahu, ktoré vytvára strmý erózný breh

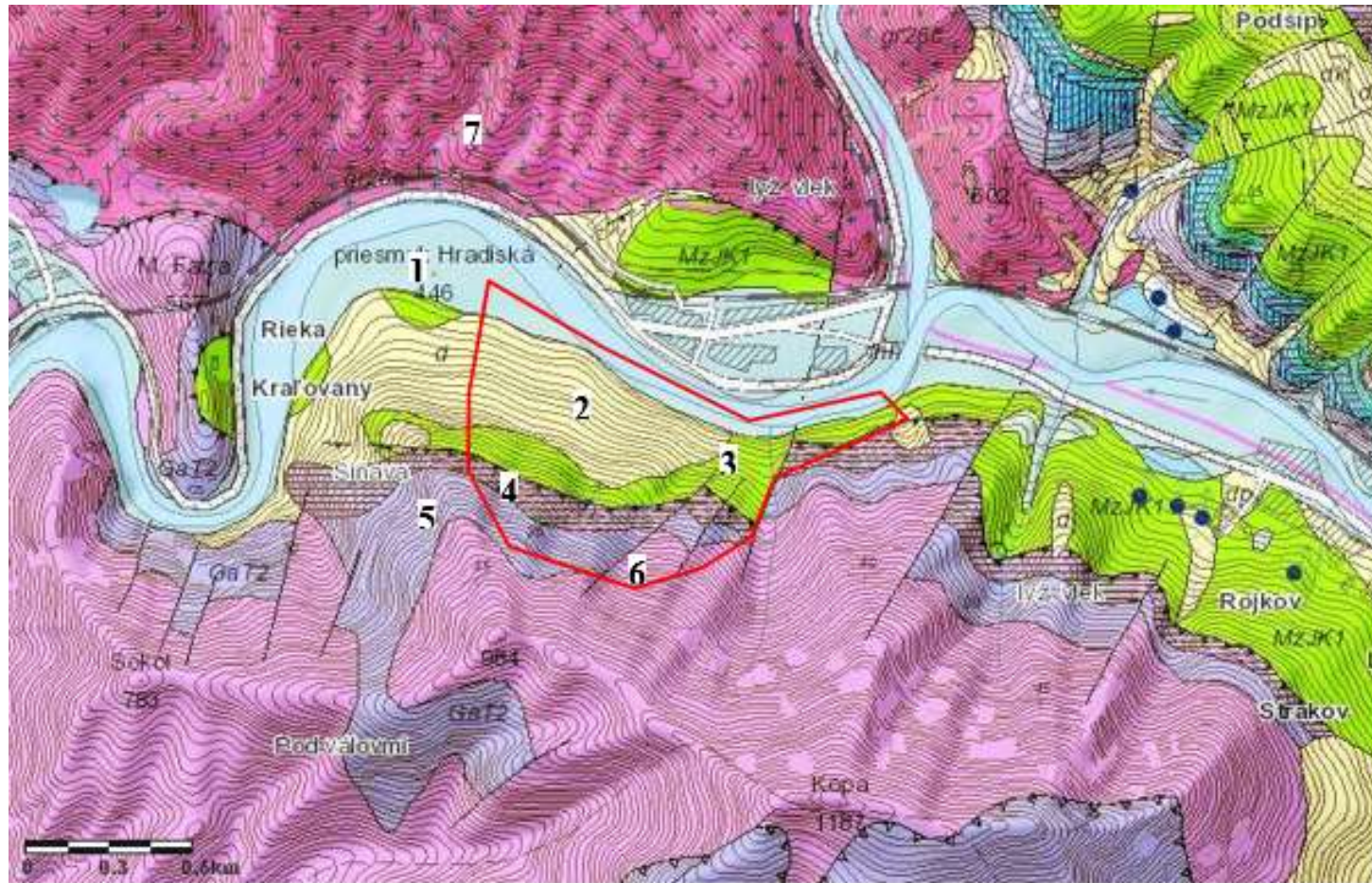
rieky Váh. Výška strmej úpäťnej časti svahu v oblasti svahovej deformácie dosahuje cca 12 až 23 m. Pozdĺž súčasného brehu koryta rieky je vyvinutý iba nesúvislý úzky pruh inundačnej aluviálnej nivy do vzdialenosti 0 až 4 m. Iba v západnej časti územia sú strmé úpäťta svahov ukončené rozľahlým rovinným územím aluviálnej nivy. Vo východnej časti je strmý svah prerušený pruhom vážskej terasy s rovinným územím, ktoré je ukončené výrazne strmou eróznou hranou výšky cca 7 až 15 m. Medzi korytom Váhu a päťou terasového stupňa bol vybudovaný v úzkom pruhu násyp prístupovej brehovej komunikácie (Šimeková et al., 2018).

Z geologického hľadiska (obr. 3) sa svahové poruchy vyvíjali v plastickom kriedovom súvrství flyšového charakteru – slieňovce, slienité vápence, bridlice (fatrikum – krížňanský príkrov). V jeho nadloží sa v horných častiach svahu v tektonickej pozícii nachádzajú rigidné a dobre priepustné karbonátové horniny (hronikum – chočský príkrov).

Posudzované územie je súčasťou rozsiahleho komplexného zosuvného frontálneho pásma, s vývojom viacerých generácií a typov svahových deformácií s rôznou aktivitou svahových pohybov. Predpokladá sa, že svahové poruchy sa vyvíjali postupne v nadväznosti na zarezávanie rieky Váh, od pleistocénu až po súčasnosť. Primárne deformácie vznikali pravdepodobne v miestach tektonického styku dvoch odlišných litologických komplexov (najvyššie položené odľučné oblasti). S postupujúcou eróziou Váhu, zvetrávaním tektonicky porušených hornín a pôsobením podzemnej vody, dochádzalo v strmých svahoch k vzniku niekoľkých generácií zosuvov po rôzne hlbokých šmykových plochách, ktorých akumulčné oblasti v súčasnosti siahajú až k päťte svahu (Šimeková et al., 2018). Svahovými deformáciami je v rámci územia porušené horninové prostredie do rôznych hĺbok obvykle od 11 m až do 25 m, v jednom z vrtoch bola bazálna šmyková plocha zdokumentovaná až v hĺbke 29,7 m (Fussgänger et al., 2010).



Obr. 2 Situovanie posudzovaného územia Kral'ovany v rámci Slovenskej republiky



Obr. 3 Geologická mapa (zdroj: geology. sk, prevzaté Šimeková et al., 2018). Vysvetlivky: kvartér: 1 – fluviálne sedimenty, 2 – deluviálne sedimenty, fatrikum: 3 krieda – slieňovce, slienité vápence, slienité bridlice (mráznické súvrstvie), hronikum: 4 trias – ramsauské dolomity, 5 trias – gaderské vápence, 6 – wettersteinské dolomity, paleozoikum: 7 – biotitické granodiority. Červená línia približne ohraňuje hodnotené územie

Metodika merania

Refrakčná seizmická tomografia (SRT) využíva umelo vybudené seizmické vlny, konkrétne kriticky refragovanú a priamu vlnu, na určenie hĺbky rýchlostného rozhrania a stanovenie rýchlostí šírenia sa seizmických vln v jednotlivých vrstvách medzi rozhraniami. Výsledkom spracovania refrakčných meraní je rýchlostný model prostredia.

Metóda ERT umožňuje získať informácie o rozložení merného elektrického odporu v horizontálnom a vertikálnom smere. ERT prieskum môže byť realizovaný rôznymi elektródovými usporiadaniami. Výber správneho elektródového usporiadania a voľba elektródovej vzdialenosti závisí do veľkej miery na druhu požadovanej informácie, hustoty merania a prítomnosti šumu. Výsledkom spracovania sú inverzné odporové rezy a interpretované geologicko-geofyzikálne rezy.

Na lokalite Kral'ovany boli merania SRT a ERT realizované na dvoch paralelných profiloch P1 a P2 vzdialených od seba 580 metrov (obr. 4). Dĺžka profilu P1 bola 105 m a bol vedený v blízkosti inklinometrických vrtov 6a/INK-6 a 13-INK/N. Profil P2 bol dlhý 140 m a viedol popri vrtoch INK-10 a INK-11. Obidva profily boli situované v generačne najmladších zosuvoch, pretože terénne podmienky neumožňovali iné vedenie profilov. Začiatok profilov sa nachádzal v čele zosuvu pri rieke Váh na husto zarastenej lúke a vrchná časť v zalesnenej časti svahu. Každý profil bol premeraný oboma geofyzikálnymi metódami.



Obr. 4 Schematické znázornenie aktivity zosuvného frontálneho pásma "Kral'ovianskeho zosuvu" s vyznačenou polohou geofyzikálnych profilov (Bednarik a kol., 2019 - upravené)

Refrakčné seizmické meranie bolo realizované 36 kanálovou seizmickou aparátúrou M.A.E. A6000-S so 14 Hz vertikálnymi geofónmi pre záznam P vln. Ako zdroj slúžilo kladivo. Rozostup geofónov na profile P1 bol 3 m, body budenia boli rozmiestnené v intervale 6 m. Na profile P2 bol rozostup geofónov 4 m a body budenia boli rozmiestnené v intervale 8 m. Namerané dáta boli spracované v programe

Reflexw Version 8.0 a v programe ZondST2D a to procesingovými metódami pre refrakčnú seizmiku a refrakčnú seizmickú tomografiu. Vstupný model pre inverziu bol pre spracovanie v programe Reflexw vytvorený analýzou sklonu nameraných hodochrón (obr. 5a), pri spracovaní v programe ZondST2D bol použitý gradientový model s vhodným nastavením rýchlostného rozpätia (obr. 5b).

Na meranie ERT bola použitá geoelektrická aparátúra ARES II (výrobca GF Instruments, s.r.o., Brno), s káblovým systémom MCC5 a usporiadanie dipól-dipól. Elektródová vzdialenosť pri meraní bola zvolená na 3,0 m. ERT merania boli spracované v inverznom programe Res2DInv.

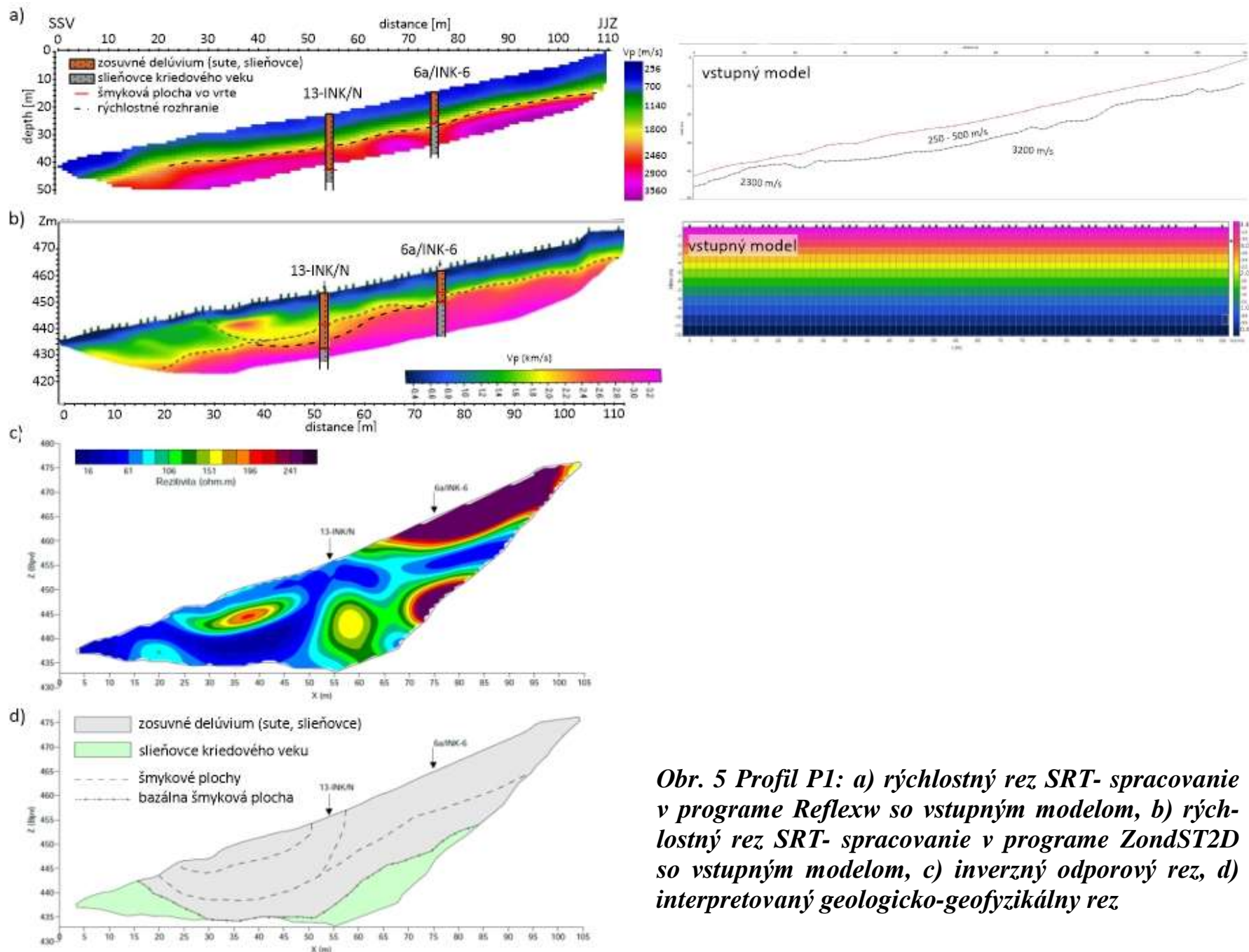
Merania boli polohovo a výškovo zamerané aparátúrou Trimble GeoXR s využitím technológie GNSS (využitím služby SKPOS).

Výsledky merania

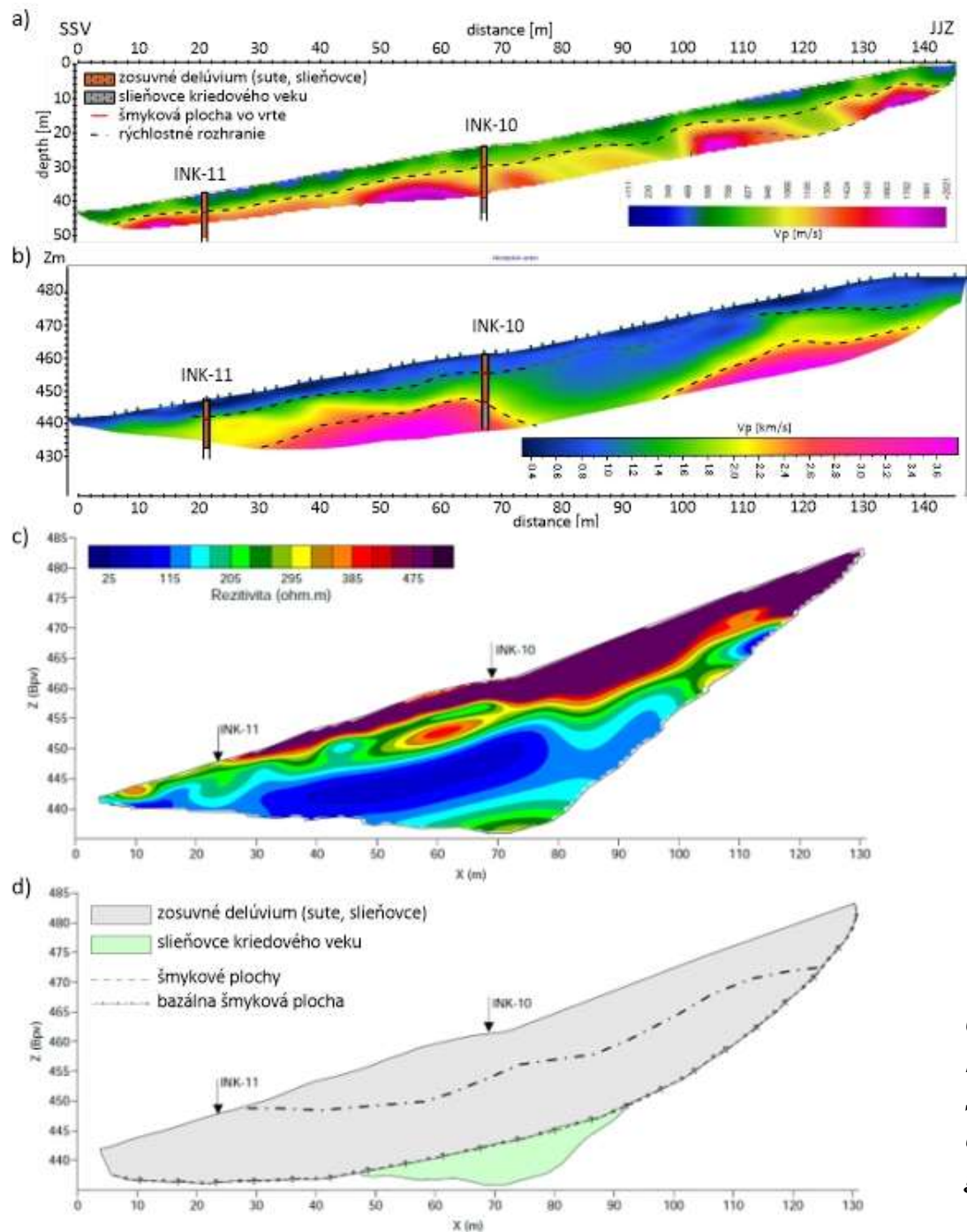
Výsledkom spracovania geofyzikálnych meraní sú rýchlostné profily a inverzné odporové rezy. Tie boli pri interpretácii korelované s údajmi z vrtných a karotážnych prác (spracované v Grenčíková, 2011 a Bednarik a kol., 2019). Na základe týchto údajov boli na interpretovaných profiloch vyčlenené dva litologické celky - zosuvné delúvium, a slieňovce kriedového veku, a vyznačený priebeh šmykových plôch.

Na rýchlostných rezoch z profilu P1, spracovaných ako v programe Reflexw (obr. 5a) tak i ZondST2D (obr. 5b), je pod povrchom zachytená vrstva s rýchlosťami do 2400 m/s interpretovaná ako sedimenty zosuvného delúvia. V hĺbke približne 6 až 8 metrov dochádza k výraznému nárastu rýchlosti (nad 3000 m/s) čo naznačuje prítomnosť kompaktnejších slieňovcov kriedového veku. Toto rýchlostné rozhranie, ktoré je interpretované ako šmyková plocha zosuvu, koreluje na oboch spracovaniach s údajmi z vrtu 6a/INK-6, kde bol v hĺbke 7,5 m na inklinometrických meraniach zaznamenaný výrazný pohyb. Rozdiel vo výsledkoch spracovania medzi použitými softvérmi sa prejavil v spodnej časti svahu, v úseku metráže 0 - 62 m. Kým charakter rýchlostného prechodu medzi interpretovanými vrstvami zosuvného delúvia a kompaktnejších slieňovcov je v spracovaní z Reflexw (obr. 5a) v celej dĺžke profilu rovnaký, na rýchlostnom profile z programu ZondST2D (obr. 5b) je prechod medzi interpretovanými rýchlostnými vrstvami v dolnom úseku plynulejší. Navyše je na spracovaní zo ZondST2D v hĺbke 5 - 9 m pod povrchom (metráž 32 - 42 m) oblasť vyšších rýchlostí. V tejto dolnej časti profilu sa na spracovaní zo ZondST2D interpretované rýchlostné rozhranie zahlbuje do hĺbky približne 20 metrov. Údaje z vrtu 13-INK/N ukazujú, že tu dochádza k prehĺbeniu zosuvného delúvia. To potvrdzuje predpoklad prítomnosti viac ako jednej šmykovej plochy. Rýchlostný profil spracovaný s použitím gradientového vstupného modelu (obr. 5b) koreluje aj s výsledkami spracovania ERT meraní (obr. 5c). Výsledná interpretácia priebehu šmykových plôch na profile P1 je zobrazená na obr. 5d.

Aj na profile P2 (obr. 6) sa na rýchlostných rezoch (obr. 6a a 6b) prejavil kontakt sedimentov delúvia a podložných slieňovcov kriedového veku nárastom rýchlosti. Pri spracovaní v programe ZondST2D (obr. 6b), sa podobne ako na profile P1, podarilo zachytiť priebeh oboch šmykových plôch, ktoré korelujú so šmykovými plochami zachytenými vo vrte INK-10 (hĺbka 6 a 15 metrov) ako i s výsledkami spracovania ERT meraní (obr. 6c). Interpretovaný priebeh šmykových plôch na profile P2 je zobrazený na obr. 6d.



Obr. 5 Profil P1: a) rýchlostný rez SRT- spracovanie v programe Reflexw so vstupným modelom, b) rýchlostný rez SRT- spracovanie v programe ZondST2D so vstupným modelom, c) inverzný odporový rez, d) interpretovaný geologicko-geofyzikálny rez



Obr. 6 Profil P2: a) rýchlostný rez SRT- spracovanie v programe Reflexw, b) rýchlostný rez SRT- spracovanie v programe ZondST2D, c) inverzný odporový rez, d) interpretovaný geologicko-geofyzikálny rez

Záver

Geofyzikálne metódy v kombinácii SRT a ERT poskytli spojitú informáciu o priebehu šmykovej plochy na lokalite Kraľovany. Rýchlostný obraz na SRT profiloch dobre koreloval s litologickým obrazom zachyteným vo vrtoch, hlavne na kontakte sedimentov zosuvného delúvia a kriedových slieňovcov. Bazálna šmyková plocha sa prejavila výrazným nárastom rýchlostí na tomto kontakte. Výsledky SRT teda umožnili detailnejšie ohraničiť zosuvné delúvium, pod ktorým sa nachádzajú kompaktnjšie kriedové vápence. Inverzné odporové rezy umožnili okrem určenia bazálnej šmykovej plochy presnejšie interpretovať aj priebeh čiastkových plytkých šmykových plôch. Zaujímavým poznatkom je i fakt, že pri SRT najlepšiu zhodu dosiahli merania spracované použitím gradientového sieťového modelu ako vstupného modelu pri spracovaní refrakčnej tomografie. Tie zachytili priebeh oboch šmykových plôch zaznamenaných vo vrtoch, na rozdiel od výsledkov spracovania so vstupným modelom vytvoreným na základe analýzy sklonu hodochrón, ktorý bol pravdepodobne zaťažený subjektívnou interpretáciou.

Výsledky potvrdili predpoklad, že Kraľoviansky zosuv je komplexom viacerých čiastkových zosuvov. Tento komplex vyžaduje pravidelný monitoring. Jeho súčasťou by mali byť aj opakované geofyzikálne merania, ktoré prispievajú k sledovaniu časového vývoja zosuvu. Táto štúdia tiež demonštruje výhodu a súčasne potrebu kombinácie viacerých geofyzikálnych metód (v tomto prípade SRT a ERT). Každá metóda zachytáva horninové prostredie z pohľadu iných fyzikálnych vlastností. Tieto informácie sa pri ich kombináciách dopĺňajú a vedú k presnejšej interpretácii nameraných parametrov.

PodĎakovanie:

Tento výskum bol financovaný Agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR, grantovými projektami VEGA č. 1/0182/23 a 1/0180/24 a projektom APVV-21-0159.

References

- BEDNARIK, M., TORNYAI, R., MAĽA, M., PUTIŠKA, R., DOSTÁL, I., 2019: *D1 Turany – Hubová v km 4,7 - 6,4 údolného variantu V1 - zabezpečenie monitoringu inklinometrických vrtov, doplnkový inžinierskogeologický prieskum. Záverečná správa. Geofond ŠGÚDŠ Bratislava, 44 s.*
- BLÁHA, P., 2017: *Geofyzika a svahové deformácie. Brno: PB Print Příbram, 338 s.*
- DOSTÁL, I., PUTIŠKA, R., KUŠNIRÁK, D., 2014: Determination of shear surface of landslides using electrical resistivity tomography. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 44(2), 133-147. <https://doi.org/10.2478/congeo-2014-0008>
- FUSSGÄNGER, E., GAŽÚR, J., COPLÁK, M., COPLÁKOVÁ, J., HANES, P., 2010: *Diaľnica D1 Turany – Hubová (úsek 2), Zosuvné územie 6a (km 4,45 – 6,20), Svahové poruchy na južných svahoch Váhu pri Kraľovanoch, doplnkový inžinierskogeologický prieskum – I. etapa. Záverečná správa. Geofond ŠGÚDŠ Bratislava, 14 s.*
- GREŇČIKOVÁ, A., 2011: *Diaľnica D1 Turany – Hubová, Kraľoviansky zosuv, geotechnický monitoring – II. etapa. Záverečná správa. Geofond ŠGÚDŠ Bratislava.*
- JOHMAN, D., GRAMBOIS, S., 2007: Geophysical investigation of landslides: A review, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 178, 2, p. 101-112.

- OLABODE, O. P., LIM, H. S., RAMLI, M.H., 2022: Geophysical and geotechnical evaluation of landslide slip surface in a residual soil for monitoring of slope instability. *Earth and Space Science*, 9 (<https://doi.org/10.1029/2022EA002248>)
- ŠIMEKOVÁ, J., PÁLENÍK, M., SLUKA, V., SŇAHNIČAN, J., 2018: *DI Turany – Hubová, posúdenie stavu zosuvných území v oblasti „Kraľovianskeho zosuvu,“ odborný geologický posudok. Záverečná správa. Geofond ŠGÚDŠ Bratislava, 45 s.*
- UHLEMANN, S., HAGEDORN, S., DASHWOOD, B., MAURER, H., GUNN, D., DIJKSTRA, T., CHAMBERS, J., 2016: Landslide characterization using P- and S-wave seismic refraction tomography — The importance of elastic moduli. *Journal of Applied Geophysics*, 134, str. 64-76 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116302439>)
- Stratégia hospodárskej politiky Slovenskej Republiky do roku 2030. Správa o hodnotení strategického dokumentu podľa zákona 24/2006 Z.z. v znení neskorších predpisov.* 2018, Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky, Bratislava. (<https://www.economy.gov.sk/uploads/files/wRKb2ncO.pdf>)

Autori

- ¹ Jana Lahučká - Department of Environmental Geochemistry, Division of Geology, State Geological Institute of Dionýz Štúr – Bratislava, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11, Slovakia
- ² René Putiška – Department of Engineering Geology, Hydrogeology and Applied Geophysics, Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovakia
- ³ Martin Bednarik – Department of Engineering Geology, Hydrogeology and Applied Geophysics, Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovakia
- ⁴ Bibiana Brixová (bibiana.brixova@uniba.sk) - Department of Engineering Geology, Hydrogeology and Applied Geophysics, Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovakia