Slovenská agentúra životného prostredia
Slovenská asociácia inžinierskych geológov
Katedra geotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave
Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky PRIF UK v Bratislave

INŽINIERSKA GEOLÓGIA 2022

Zosuvy a riziká spojené so zmenami klímy

Odborní garanti konferencie: **prof. RNDr. Miloslav Kopecký, PhD.**
prof. RNDr. Martin Bednárik, PhD.

SPEKTRUM STU

Zborník príspevkov konferencie INŽINIERSKA GEOLÓGIA 2022
Zosuvy a riziká spojené so zmenami klímy

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU

Náklad 100 kusov CD a USB kľúč, 250 strán
Editori: Jana Frankovská, Martin Ondrášik, Pavel Liščák

Za obsahovú stránku príspevkov zodpovedajú autori. Príspevky neprešli jazykovou úpravou.

Recenzovali: prof. RNDr. František Baliak, PhD., prof. Ing. Jozef Hulla, PhD.,
doc. Ing. Lumír Míča, PhD., doc. RNDr. Ján Vlčko, CSc.

ISBN 978-80-227-5204-6

© 2022 Slovenská technická univerzita v Bratislave

Organizačný výbor konferencie

Predseda:	RNDr. Tatiana Durmeková, PhD.	PriF UK Bratislava
	Mgr. Martin Ondrášik, PhD.	SvF STU v Bratislave
	RNDr. Martin Brček, PhD.	SvF STU v Bratislave
	Mgr. Rudolf Tornyai, PhD.	PriF UK Bratislava
	Ing. Eliška Kučová	SvF STU v Bratislave
	Ing. Juraj Slavkov	SvF STU v Bratislave

Vedecký výbor konferencie

Predseda:	prof. Ing. Jana Frankovská, PhD.	SvF STU v Bratislave
	prof. Ing. Ivan Vaníček, DrSc.	SvF ČVUT v Prahe
	prof. Ing. Peter Turček, PhD.	SvF STU v Bratislave
	doc. RNDr. Renáta Adamcová, PhD.	PriF UK Bratislava
	doc. Ing. Eva Hrubešová, PhD.	SvF VSB Ostrava
	doc. Ing. Lumír Míča, PhD.	SvF VUT v Brne
	RNDr. Vlasta Jánová, PhD.	SAIG, Bratislava
	Ing. Petr Kycl	ČGS Praha, ČAIG
	RNDr. Pavel Liščák, CSc.	ŠGÚDŠ Bratislava
	Ing. Zdeněk Sekyra	SG Geotechnika, Praha

Partneri podujatia

EkoTechnika GEOSOUL MACCAFERRI

OBSAH

ZOSUVY NA SLOVENSKU – NAJNOVŠIA PUBLIKÁCIA O SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÁCH
Vlasta Jánová a Pavel Liščák..... 6

VÝZNAMNÉ ZOSUVY V TRASE DIAĽNICE D1
Miloslav Kopecký, Martin Ondrášik, Jana Frankovská, Martin Brček, Jakub Panuška..... 16

PRÍKLADY OCHRANY CIVILNEJ INFRAŠTRUKTÚRY PRED GEODYNAMICKÝMI JAVMI TYPU SKALNÉHO RÚTENIA
Adrián Ilkanič..... 27

OŽIVENÍ STARÉHO SESUVU VE MĚSTĚ DĚČÍN, ULICE HRANIČNÍ – SELHÁNÍ SYSTÉMU VÝSTAVBY
Petr Kycl..... 40

ÚZEMNÉ PLÁNY MIEST A OBCÍ A INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM
Boris Vrábel, Peter Fekeč..... 50

ZÁCHRANNÉ PRÁCE V ROZSAHU VÝKONU BEZODKLADNÝCH HAVARIJNÝCH OPATRENÍ SVAHOVEJ DEFORMÁCIE NA LOKALITE SVÄTÝ ANTON
Jozef Sňahničan, Branislav Prelovský, Matej Mažgut, Róbert Csizmadia, Miloš Pleško, Martin Bednarik……..…… 56

SANÁCIA AKTÍVNEHO ZOSUVU V OBCI MALÁ ČAUSA
Júlia Šimeková, Pavol Tupý, Michal Páleník, Jozef Sňahničan..... 69

SANÁCIA MIMORIADNEJ SITUÁCIE NA CESTE II/531 MURÁŇ – MURÁNSKA HUTA
Vojtech Lukáč, Jozef Sňahničan, Branislav Prelovský..... 80

SANÁCIA HRADNÉHO BRALA STREČNO
Branislav Prelovský, Katarína Házyová, Vlasta Jánová..... 90

ŠTATISTICKÉ METÓDY HODNOTENIA ZOSUVNÉHO HAZARDU NA SLOVENSKU
Rudolf Tornyai, Martin Bednarik..... 100

VÝSLEDKY A ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE INŽINIERSKOGEOLOGICKÉHO MAPOVANIA SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÍ V BIELYCH KARPATOCH
Ivan Dananaj, Pavel Liščák, Peter Pauditš, Peter Ondrus, Peter Ondrejka, Ľubica Iglárová, Barbora Ondrášiková, František Teťák, Róbert Žjak, Matej Gužík, Juraj Papčo, Marek Fraštia. 111

MOŽNOSTI LOKALIZOVANIA POLOHY ŠMYKOVEJ PLOCHY
Peter Turček, Monika Súľovská..... 123

DRUHÁ GENERÁCIA EUROKÓDOV A VLASTNOSTI HORNINOVÉHO PROSTREDIA
Jana Frankovská..... 131

EFEKTÍVNE SPRACOVANIE ÚDAJOV Z ROZSIAHLEHO INŽINIERSKOGEOLOGICKÉHO PRIESKUMU POMOCOU STROJOVÉHO UČENIA
Jakub Panuška, Miloslav Kopecký, Martin Brček..... 139

ANALÝZA STABILITNÝCH POMEROV V ŠIRŠOM CENTRE MESTA ILAVA
Roman Bulko, Filip Gago 153

VPLYV ZMIEN KLIMATICKÝCH POMEROV
NA PRÍRODNÉ PROSTREDIE HLBINNÉHO ÚLOŽISKA VYSOKO RÁDIOAKTÍVNYCH ODPADOV
Miloš Kováčik 161

VYBRANÉ MOŽNOSTI ZAKLADANIA NA MÁLO ÚNOSNOM PODLOŽÍ
František Malík 167

SÚBOR NIELEN GEOTECHNICKÝCH MONITORINGOV, KTORÉ PRISPELI K ÚSPEŠNEJ MODERNIZÁCII ŽELEZNIČNEJ TRATE V OKOLÍ PÚCHOVA A POVAŽSKEJ BYSTRICE
Ladislav Stolárik, Erika Jarošová, Miloš Pleško 175

„KONCOVÁ“ PEVNOSŤ A ĎALŠIE PROBLÉMY MECHANIKY ZEMÍN V PRAXI
Jakub Roháč, Jan Boháč, Jan Najser 185

ÚČINNOSŤ HYDROFÓBNEHO NÁTERU POUŽITÉHO NA PIESKOVCI V ZÁVISLOSTI OD DOBY TVRDNUTIA
Lucia Dunčková, Tatiana Durmeková 195

VYUŽITIE TECHNOLÓGIE LiDAR PRI INŽINIERSKOGEO-LOGICKOM MAPOVANÍ SVAHOVÝCH DEFORMÁCII V JUŽNEJ ČASTI SLANSKÝCH VRCHOV A KOŠICKEJ KOTLINY
Daniel Grega, Marián Stercz, Katarína Pačajová, Ľubomír Petro, Gabriela Bystrická, Martin Surový 202

STANOVENIE ŠMYKOVÝCH A DEFORMAČNÝCH VLASTNOSTÍ HRUBOZRNNÝCH ZEMÍN POMOCOU TERÉNYCH A LABORATÓRNYCH SKÚŠOK
Eliška Kučová, Juraj Slavkov 214

INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM PRE NÁVRH ENERGETICKÝCH GEOKONŠTRUKCIÍ
Juraj Slavkov 223

ZABEZPEČENIE STABILITY ERODUJÚCEHO ZÁREZU ZA RODINNÝM DOMOM
Jakub Stacho, Jakub Panuška 231

VPLYV METODIKY SKÚŠOK NA STANOVENIE ZÁKLADNÝCH VLASTNOSTÍ BENTONITOV
Jana Frankovská, Martin Brček, Miloslav Kopecký 238

ŠTÚDIUM INŽINIERSKEJ GEOLÓGIE A HYDROGEOLÓGIE – 70. VÝROČIE EXISTENCIE NA PRÍRODOVEDECKEJ FAKULTE UK V BRATISLAVE
Martin Bednárik, Renáta Fľaková, Tatiana Durmeková 244

ZOSUVY NA SLOVENSKU – NAJNOVŠIA PUBLIKÁCIA O SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÁCH

LANDSLIDES IN SLOVAKIA – THE LATEST PUBLICATION ON SLOPE DEFORMATIONS

Vlasta Jánová[1] – Pavel Liščák[2]

[1]Bajzova 6, 821 08 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: e-mail: vlasta0811@gmail.com
[2]Štátny geologický ústav D. Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: pavel.liscak@geology.sk

Abstrakt:
Publikácia obsahuje okrem všeobecných kapitol prehľad výskumu, registrácie a mapovania svahových deformácií na území Slovenska od vydania výnimočnej publikácie A. Nemčoka v roku 1982 – Zosuvy v slovenských Karpatoch. Zároveň prezentuje výsledky najvýznamnejších geologických úloh zameraných na prieskum, monitorovanie a sanáciu svahových porúch, ponúka doposiaľ nepublikované výsledky Atlasu máp stability svahov Slovenskej republiky a prehľad kvantitatívnych metód hodnotenia vzniku svahových deformácií na Slovensku. Samostatná kapitola je venovaná svahovým deformáciám vzniknutým v roku 2010, nakoľko v tomto z hľadiska inžinierskej geológie mimoriadnom roku bolo na území Slovenska zaznamenaných až 577 nových, príp. reaktivizovaných zosuvov. Druhá polovica publikácie približuje čitateľovi súčasné metódy inžinierskogeologického prieskumu svahových deformácií, metódy monitorovania a sanácie zosuvných svahov a ponúka príklady aplikácie niektorých metód v praxi.

Abstract: In addition to general chapters, the publication contains an overview of research, inventory and mapping of slope deformations in Slovakia since the issuance of the exceptional publication Landslides in the Slovak Carpathians by A. Nemčok in 1982. It also presents the results of the most important geological projects focused on the survey, monitoring and remediation of slope deformations, offers up to now unpublished results of the Atlas of Slope Stability Maps of the Slovak Republic and an overview of quantitative methods for assessing slope deformations in Slovakia. A separate chapter is devoted to slope deformations that occurred in 2010, as in this extraordinary year in terms of engineering geology, up to 577 new or reactivated landslides were recorded in the territory of Slovakia. The second half of the publication introduces the reader to the current methods of engineering geological survey of slope deformations, methods of monitoring and remediation of sliding slopes and offers examples of the application of some methods in practice.

Kľúčové slová: publikácia, svahová deformácia, zosuv, registrácia, mapovanie, metódy prieskumu, sanácie, monitoringu

Key words: publication, slope deformation, landslide, inventory, mapping, methods of survey, remediation, monitoring

1. Úvod

Svahové deformácie predstavujú na Slovensku popri povodniach jeden z najvýznamnejších geodynamických javov, ktorý významne ovplyvňuje optimálne využívanie územia a prevádzku technických diel. Svahy porušené svahovými deformáciami ohrozujú desiatky tisíc rôznych pozemných stavieb, stovky kilometrov diaľnic a ciest, desiatky až stovky kilometrov železníc, vodovodov, plynovodov ropovodov a nadzemných elektrických vedení. Z uvedeného dôvodu je problematika svahových deformácií stále veľmi aktuálna a jej riešeniu sa ročne venujú desiatky geologických úloh.

Publikácia Zosuvy na Slovensku (obr. 1) vznikla vďaka národnému projektu „Zlepšovanie informovanosti a poskytovanie poradenstva v oblasti zlepšovania kvality životného prostredia na Slovensku“, ktorého riešenie a aktivity zabezpečuje Slovenská agentúra životného prostredia. Projekt je spolufinancovaný z Kohézneho fondu EÚ v rámci Operačného programu Kvalita životného prostredia (2014 – 2020).

Autorský kolektív publikácie tvorili skúsení odborníci z oblasti inžinierskej geológie, ktorí sa celé desaťročia venujú problematike svahových deformácií, menovite RNDr. Vlasta Jánová, PhD., RNDr. Pavel Liščák, CSc., prof. RNDr. Miloslav Kopecký, PhD., prof. RNDr. Martin Bednarik, PhD., RNDr. Júlia Šimeková, Mgr. Martin Ondrášik, PhD., RNDr. Peter Pauditš, PhD., RNDr. Pavol Tupý, Ing. Ľubomír Petro, CSc., RNDr. Peter Ondrejka, PhD., Doc. Mgr. Vladimír Greif, PhD. a RNDr. Peter Ondrus. Recenzentom publikácie bol prof. RNDr. František Baliak, PhD.

Hlavným impulzom k napísaniu tejto publikácie bol fakt, že v posledných desaťročiach bolo na Slovensku realizovaných množstvo významných geologických úloh v oblasti identifikácie, mapovania, prieskumu a sanácie svahových deformácií, a tieto neboli zosumarizované v žiadnom komplexnejšom diele. Od vydania výnimočnej a neprekonateľnej publikácie Arnolda Nemčoka – Zosuvy v slovenských Karpatoch – v roku 1982 uplynulo takmer štyridsať rokov. A tak ako základom jeho knihy boli významné (štátne) geologické úlohy a výsledky podrobného geologického výskumu a prieskumu, sú aj základom publikácie Zosuvy na Slovensku geologické úlohy riešené za posledné desiatky rokov.

Obr. 1 Titulná strana publikácie
Fig. 1 Title page of the publication

2. Všeobecné kapitoly publikácie

Prvé štyri kapitoly publikácie majú viac-menej všeobecný charakter. Základné pojmy týkajúce sa svahových deformácií boli zväčša prevzaté z publikácie Inžinierskogeologický a geotechnický terminologický slovník (Petro a kol., 2008), niektoré boli doplnené autormi publikácie.

Kapitola 2. Svahové pohyby učebnicovým spôsobom vysvetľuje pôsobenie aktívnych a pasívnych síl pôsobiacich na svahu a od čoho závisí výsledný stupeň stability. Kapitola obsahuje tiež prehľad najvýznamnejších svahových deformácií na Slovensku za posledných 70 rokov (tab. 1).

Kapitola 3 sumarizuje podmienky, faktory a príčiny vzniku svahových pohybov. Geologicko-tektonická stavba, ktorá ovplyvňuje aj geomorfologické a hydrogeologické pomery svahov, je určujúcou podmienkou vzniku svahových pohybov. Ako vyplýva z Atlasu máp stability svahov SR (Šimeková a kol., 2006) štatisticky najčastejší výskyt svahových pohybov je na území tvorenom paleogénom a mezozoikom bradlového pásma (14,8 %) a paleogénom vonkajšieho flyšového pásma (12,7 %). Uvedené percentá sú odvodené z celkovej plochy geologicko-tektonickej jednotky. Nasledujú neogénne vulkanity, hlavne ich okrajové časti (9,3 %) a vnútrokarpatský paleogén (7,2 %). Najmenej porušené sú mezozoické horniny (2,4 %), neogénne a kvartérne sedimenty nížin (1,5 %) a horniny kryštalinika (1,5 %).

Tab. 1 Prehľad najvýznamnejších svahových deformácií za posledných 70 rokov
Tab. 1 An overview of the most significant slope deformations in the last 70 years

Lokalita svahovej deformácie	Typ svahovej deformácie	Rok vzniku/ reaktivizácie	Rozmery (m)	Plocha (m^2)	Objem (m^3)	Následky
Handlová	zosuv	1960-1961	1 800 x 1 200	906 615	20 mil.	zničených 150 domov, 2 km štátnej cesty, ohrozená železnica, zničený vodovod, aj linka vysokého napätia
Podhradie	zosuv	1978	1 100 x 600	238 000	18 mil.	poškodených 116 domov
Nižná Myšľa	zosuv	2010	1 600 x 350	416 222	6,8 mil.	poškodených 40 rodinných domov, 29 muselo byť asanovaných, poškodená infraštruktúra obce
Ľubietová	zosuv	1977	1 200 x 00	297 000	4,5 mil.	zničené 4 domy, hrozilo prehradenie doliny a zatopenie obce
Kapušany	zosuv	2010	500 x 250	85 419	1,4 mil.	porušených 20 rodinných domov, 7 neobývateľných
Okoličné	zosuv	1949, 1961	750 x 260	143 585	*	ohrozená žel. trať Žilina- Košice v úseku 500 m
Riečnica	zemný prúd	1962	950 x 250	135 000	0,9 mil.	zničená osada Lieskové, porušené ďalšie dve osady, prehradené koryto potoka Riečnica, vzdutá voda ohrozovala ďalšie obce
Kraľovany	skalný zosuv	2013-2014	520 x 480	101 235	*	ohrozené rodinné domy, reštaurácia, jazero, cesta 1. triedy, železnica na trati Žilina - Ružomberok
Potok	potenciálny zosuv	*	800 x 400	2 356 000	*	ohrozená cesta
Vrátna dolina	kamenito-hlinité prúdy	2014	*	514 487	*	poškodená údolná stanica lanovky, zničená cesta, zničených 50 osobných áut
Varhaňovce	zosuv	2010	500 x 500	107 762	*	porušených 15 domov, hrozba prehradenia potoka a záplavy obce
Podbiel	skalné zrútenie	1975			22 tis.	zasypaná železničná trať a časť koryta rieky Oravy
Turčianske Kľačany	viacgeneračný zosuv	*1955	1 110 x 2 500	2 134 000	40 mil.	čelo zosuvu zasahuje do Váhu
* presný údaj nie je známy						

Z analýzy príčin svahových pohybov, ktorá bola vykonaná v rámci Atlasu máp stability svahov SR (Šimeková, J. a kol., 2006) vyplýva, že z prírodných príčin majú na vznik svahových porúch najväčší vplyv klimatické faktory v kombinácii s eróznou činnosťou – 45,2 %; klimatické faktory v kombinácii s vývermi podzemných vôd – 17 %; klimatické faktory – 17 %; vývery podzemnej vody a vztlakové účinky podzemnej vody v kombinácii s eróznou činnosťou riek – 9,8 %. Z antropogénnych príčin ide najmä o podrezanie svahu – 49 %, podrúbanie – 18 % alebo priťaženie svahu – 16,3 % (Kopecký a kol., 2008).

Klasifikácia svahových pohybov u nás aj vo svete je predmetom 4. kapitoly. Keďže na Slovensku je najviac používaná klasifikácia podľa Nemčoka, Pašeka a Rybáře (1974), ktorá rozdeľuje svahové pohyby na základe rýchlosti pohybu a mechanizmu pohybu na štyri skupiny: plazenie, zosúvanie, stekanie a rútenie; autori plne rešpektovali uvedenú klasifikáciu pri delení podkapitol. Kapitola je doplnená klasifikáciou svahových deformácií podľa socio-ekonomickej významnosti odporúčanou Európskou komisiou.

3. Prehľad výskumu, registrácie a mapovania svahových deformácií na území Slovenska a geologických úloh zameraných na prieskum, monitorovanie a sanáciu svahových porúch

Cieľom 5. kapitoly publikácie bolo zosumarizovať históriu výskumu, registrácie a mapovania svahových deformácií na území Slovenska a geologických úloh zameraných na prieskum, monitorovanie a sanáciu svahových porúch, najmä po roku 1960, keď došlo ku katastrofálnemu handlovskému zosuvu a vyvstala potreba systematického výskumu svahových deformácií na našom území. Publikácia popisuje jednotlivé etapy registrácie svahových deformácií a najvýznamnejšie geologické úlohy regionálneho významu. Medzi kľúčové geologické úlohy možno zaradiť:

- Svahové pohyby v karpatskom flyši na Slovensku – etapová správa úlohy Zákonitosti svahových deformácií v rôznych geologických štruktúrach Slovenska (Baliak a kol., 1979),
- Svahové pohyby v neovulkanických pohoriach Slovenska, (Nemčok a kol., 1977),
- Súbor máp geofaktorov životného prostredia v mierke 1: 50 000 (pre rôzne regióny boli zostavené mapy náchylnosti územia k svahovým deformáciám) (od 1993 – dodnes),
- Inžinierskogeologický výskum vybraných oblastí SSR (v rámci štátnej úlohy boli riešené úlohy ako napr. Prognóza vzniku svahových deformácií v Breznianskej kotline (Modlitba a kol., 1987), Prognóza vzniku svahových deformácií v oblasti stredného Považia (JZ časť Javorníkov) (Kováčik, Kováčiková, 1987), Vplyv geologickej stavby územia na vznik a rozvoj svahových deformácií v severnej časti Košickej kotliny a Slanských vrchov (Spišák a kol., 1987) a iné),
- Pasportizácia svahových deformácií vo vzťahu k cestnej a železničnej sieti a k trasám hlavných produktovodov Stredoslovenského kraja a vybraných okresov (BJ, HN, SK, TV) Východoslovenského kraja (Masný a kol., 1997, 1998, 1999, 2000, 2001),
- Prehodnotenie svahových deformácií najzraniteľnejších území flyšového pásma Západných Karpát (Grenčíková – Žabková, 2002),
- Zhodnotenie efektívnosti prieskumno-sanačných prác a účinnosti stabilizačných opatrení na zosuvoch v rôznych geologických štruktúrach Slovenska (Jadroň a kol., 2005),
- Atlas máp stability svahov SR 1: 50 000 (1997-2006) (Šimeková a kol., 2006),
- Inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií v najohrozenejších oblastiach flyšového pásma v M 1 : 10 000“ (Grman a kol., 2011),
- Registrácia, zhodnotenie a protihavarijné opatrenia na novovzniknutých svahových deformáciách v roku 2010 v Prešovskom a Košickom kraji“ (Liščák a kol., 2010),
- Inžinierskogeologický prieskum havarijných zosuvov vzniknutých v roku 2010 (riešených 37 zosuvov),
- Sanácia havarijných zosuvov na vybraných lokalitách – úloha riešená vo viacerých etapách zahŕňala 22 zosuvov.

Od roku 2017 bolo možné využívať na riešenie problematiky svahových deformácií aj fondy Európskej únie prostredníctvom Operačného programu Kvalita životného prostredia (2014 – 2020). Podporené boli nasledujúce geologické úlohy:

- Identifikácia, registrácia a inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií (ŠGÚDŠ, 2018 – 2023),
- Inžinierskogeologický prieskum svahových deformácií (1) (ŠGÚDŠ, 2018 – 2019),
- Inžinierskogeologický prieskum svahových deformácií (2) (ŠGÚDŠ, 2019 – 2020),
- Sanácia svahových deformácií na vybraných lokalitách Slovenska (1) (MŽP SR, 2018 – 2021),
- Sanácia svahových deformácií na vybraných lokalitách Slovenska (2) (MŽP SR, 2021 – 23),
- Monitoring svahových deformácií (ŠGÚDŠ, 2018 – 2023).

Ďalej sa 5. kapitola venuje záchranným prácam vykonávaným na zosuvných lokalitách počas vyhlásenia mimoriadnej situácie v rokoch 2014 až 2020, novým trendom vo výskume svahových deformácií po roku 2006, monitoringu svahových deformácií a mapovaniu zosuvného hazardu a zosuvného rizika.

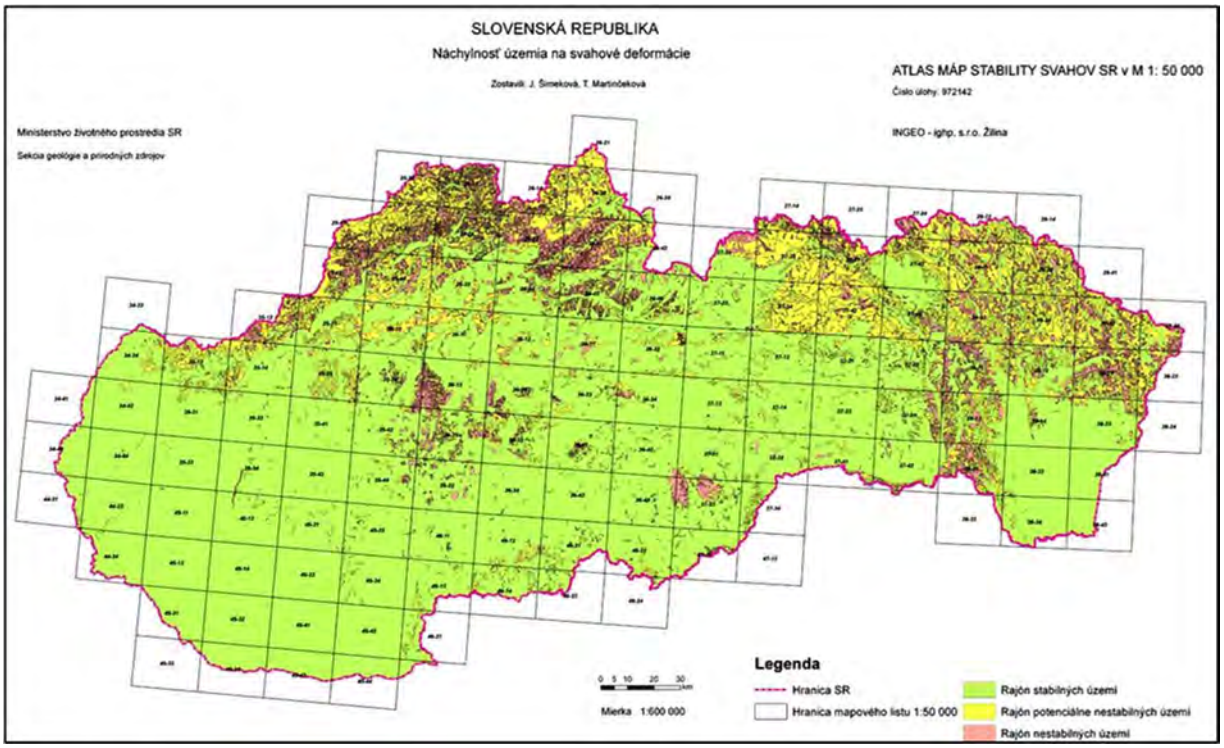
4. Atlas máp stability svahov Slovenskej republiky v mierke 1:50 000

Kapitola 6 publikácie je venovaná výsledkom geologickej úlohy, ktorá bola riešená v rokoch 1997 – 2006 – Atlas máp stability svahov Slovenskej republiky v mierke 1:50 000 (Šimeková a kol., 2006) (ďalej len Atlas zosuvov). Hlavným cieľom Atlasu zosuvov bolo zostavenie prehľadného digitálneho mapového podkladu celej Slovenskej republiky, ktorý by jednotnou metodikou spracoval všetky dovtedy zmapované a zaregistrované svahové deformácie (obr. 2), vrátane vypracovania ich databáz formou pasportu svahovej deformácie, poskytujúceho prehľadné údaje o územnom začlenení príslušnej svahovej deformácie, stupni preskúmanosti, charakteristike svahovej deformácie, jej rozlohe, ohrození stavebných a iných objektov, príčinách vzniku a prípadnej sanácii. Úlohou zostavenia Atlasu zosuvov nebolo podrobnejšie celoplošné mapovanie nepreskúmaných oblastí, ale zosúladenie hodnotenia porušených území excerpovaných z rôznych východiskových geologických podkladov, terénne overenie nedostatočných, resp. sporných údajov o svahových deformáciách prebratých z archívnych materiálov a iba v ojedinelých prípadoch rekognoskácia nepreskúmaných území za účelom zistenia rizikových svahových deformácií, predstavujúcich hrozbu pre obyvateľstvo a existujúce stavebné objekty (Šimeková a kol., 2006).

Výsledky riešenia geologickej úlohy sú veľmi cenné a neboli doteraz podrobne publikované. Z analýzy porušenosti územia SR svahovými deformáciami, ktorá bola vykonaná v rámci riešenia Atlasu zosuvov vyplýva, že v roku 2006 bolo sumárne zaevidovaných 21 190 svahových deformácií. Z hľadiska plošného rozsahu zaregistrované svahové deformácie zaberajú 257 591,2 ha, čo predstavuje 5,25 % celkovej rozlohy územia SR.

Z celkového počtu zaregistrovaných svahových deformácií až 90,15 % tvoria zosuvy a na ostatné typy svahových deformácií pripadá menej ako 10 %. Z hľadiska hodnotenia porušených plôch, ktoré je reprezentatívnejšie ako hodnotenie početnosti, je taktiež výrazne najvyššie zastúpenie zosuvov (78,12 %) pred blokovými deformáciami (15,31 %) a ostatnými typmi svahových porúch, vrátane kombinovaných (spolu 6,57 %) (Šimeková a kol., 2006).

Atlas zosuvov obsahuje okrem iného podrobné analýzy výskytu svahových deformácií vo vzťahu ku geologickej stavbe územia, k sklonitosti svahov, k inžinierskogeologickým regiónom a oblastiam a tiež vo vzťahu k územno-správnym jednotkám Slovenska. Cenným prínosom je aj kvantifikácia objektov ohrozených svahovými deformáciami.



Obr. 2 Mapa stability svahov SR s vyznačením listokladu máp M 1: 50 000 (Šimeková a kol., 2006)
Fig. 2 Slope Stability Map of the Slovak Republic with delineation of the map sheets layout at a scale of 1: 50,000 (Šimeková et al., 2006)

5. Kvantitatívne metódy hodnotenia vzniku svahových deformácií na Slovensku (náchylnosť, hazard, riziko)

Kapitola 7 publikácie je venovaná najmä tvorbe detailných máp zosuvného hazardu a rizika, kompatibilných s novými digitálnymi topografickými podkladmi (ZB GIS, ortofotomapy, LiDAR). Využívanie dostupnej výkonnej techniky (GIS, priestorové databázy), nevyhnutnej pri spracovaní často veľmi veľkého množstva údajov a pomerne náročných matematických výpočtov, umožňuje pri tvorbe máp široké využitie kvantitatívnych a numerických metód hodnotenia zosuvného hazardu a rizika. Medzi najpoužívanejšie exaktné prístupy k riešeniu danej problematiky patria deterministické prístupy a štatistické metódy (Pauditš, 2006).

V minulosti sa využitím deterministickej analýzy na výpočet rôznych stabilitných scenárov na území známych aktívnych monitorovaných zosuvov v katastri Ľubietovej a Veľkej Čausy zaoberal najmä Jelínek (2005), Jelínek, Wagner (2007). Kraľovičová a kol. (2014) riešili pomocou deterministickej analýzy stabilitu zosuvu v Chmiňanoch.

Pokiaľ ide o štatistické metódy, publikácia obsahuje prehľad a vývoj štatistických metód v hodnotení zosuvného hazardu, terminológiu a princípy rastrového údajového modelu a mapovej algebry, metodický postup zostavenia prognóznej mapy zosuvného hazardu pomocou štatistickej analýzy, spôsoby technickej prípravy parametrických máp, použitie bivariačnej analýzy s využitím váh vstupných parametrov a multivariačnej podmienkovej analýzy. Využitie uvedených metód je v publikácii prezentované na modelovom zosuvnom území Hlohovec – Sereď.

6. Rok 2010 – Rok zosuvov na Slovensku

Ôsma kapitola publikácie je venovaná zosuvom, ktoré vznikli v roku 2010, keď extrémne zrážky počas mája a júna spôsobili vysoké nasýtenie svahových sedimentov vodou. Zaregistrovaných bolo viac ako 570 nových, príp. reaktivizovaných svahových deformácií s plochou cca 293 ha. Z nich viac ako sto ohrozovalo životy, zdravie a majetok obyvateľov v postihnutých lokalitách, zvyšné zdevastovali poľnohospodársku a lesnú pôdu, životné prostredie a ľudské diela. Najviac postihnutými oblasťami Slovenska boli najmä okresy Prešovského a Košického kraja: Prešov, Stará Ľubovňa, Stropkov, Kežmarok, Bardejov, Svidník, Košice – okolie, Košice – mesto, Michalovce, Trebišov, Rožňava a Spišská Nová Ves (Liščák a kol., 2010). Ojedinele boli zosuvy zaznamenané aj v iných okresoch.

Publikácia popisuje prieskumné a sanačné práce na jednotlivých zosuvoch, najrozsiahlejšie z nich, ako napr. Nižná Myšľa, Kapušany, Nižná Hutka, Vyšná Hutka, Šenkvice, Petrovany, Krupina, Chmeľnica, Prešov – Horárska ulica, Prešov – Pod Wilec hôrkou a iné, sú popísané podrobnejšie. Katastrofálnu situáciu predstavoval hlavne zosuv v obci Nižná Myšľa, ktorý významne porušil viac ako 40 rodinných domov, inžinierske siete, miestne komunikácie a mnohé hospodárske budovy. Publikácia sumarizuje záchranné a prieskumné práce a tiež sanačné práce realizované v troch etapách.

7. Metódy inžinierskogeologického prieskumu, monitorovania a sanácie svahových deformácií

Metódy inžinierskogeologického prieskumu, monitorovania a sanácie svahových deformácií sú predmetom kapitol 9, 10 a 11 publikácie.

Metódy geologického prieskumu zosuvných svahov zosumarizované učebnicovým spôsobom v kapitole 9 zahŕňajú:

- štúdium archívnych podkladov,
- rekognoskácia územia, terénne mapovanie – vytvorenie mapy,
- terénne technické prieskumné práce,
- terénne a laboratórne skúšky vlastností hornín,
- posúdenie stability svahov.

Vzorovým príkladom posúdenia stability svahu je zosuv na lokalite Ivachnová. Samostatná podkapitola je venovaná prieskumu svahových deformácií v skalných horninách.

Kapitola 10 sumarizuje jednotlivé monitorovacie metódy, ako aj praktické poznatky a skúsenosti z doterajších meraní. Čitateľ sa okrem štandardných monitorovacích metód môže oboznámiť s najmodernejšími súčasnými monitorovacími metódami, napr. s družicovou technológiou GNSS (Globálne navigačné satelitné systémy), technológiami LiDAR (Light Detection And Ranging) a InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), metódou pulzných elektromagnetických emisií (PEE) a pod.

Kapitola 11 je venovaná popisu metód sanácie zosuvných svahov. Podľa princípu realizácie a spôsobu pôsobenia na svah sú v publikácii sanačné metódy rozdelené na:

- úpravy tvaru svahu,
- odvodnenie svahu (povrchové, podpovrchové, špeciálne)
- technické sanačné a stabilizačné opatrenia (výstavba zárubných a oporných múrov, kotvenie stien a svahov výkopov, zriaďovanie podzemných stien a pilótových stien, kombinácia metód),
- ochranu svahu pred zvetrávaním a eróziou – skalné masívy.

Publikácia predstavuje tiež použitie jednotlivých sanačných metód v praxi, podrobnejšie je popísaný kombinovaný spôsob sanácie zosuvného svahu v obci Chmiňany, cez ktorý je vedená trasa diaľnice.

Samostatná podkapitola je venovaná sanácii skalných svahov a zárezov, v rámci ktorých možno ochranné a stabilizačné opatrenia a s nimi súvisiace špeciálne konštrukcie rozdeliť na aktívne a pasívne (tab. 2).

Tab. 2 Opatrenia pre zabezpečenie stability skalných svahov (Drusa a kol., 2013)
Fig. 2 Measures to ensure the stability of rock slopes (Drusa et al., 2013)

Aktívne opatrenia			
Úprava tvaru svahu	Odvodnenie svahu	Ochrana proti zvetrávaniu, erózii	Spevňovanie povrchu Svahu
- odťaženie nestabilných častí - odľahčenie v aktívnej zóne - zmiernenie sklonu svahu - priťažovacie kamenné lavice	Povrchové - rigoly - žľaby - trativody - vodné skoky Hĺbkové - drenážne rebrá - šachty, studne - štôlne	- zahumusovanie - výsadba krovín - kotvené siete s vegetačným pokryvom - utesnenie škár a trhlín - plášte z torkrétu - obkladové múry - spevňovanie brehov - ochranné matrace	- povrchové - hĺbkové - ochranné siete - kotvenie blokov - plošné kotvenie - klincovanie a nástrek torkrétu - injektovanie podmurovanie a podchytávanie previsov

Pasívne opatrenia a konštrukcie				
Ľahké bariéry a oplotenia	Ťažké bariéry	Stabilizujúce konštrukcie	Ochranné konštrukcie	Zemné valy a priekopy
- drevené záchytné bariéry - ľahké oplotenia	- flexibilné záchytné bariéry - dynamické bariéry	- zárubné a oporné múry - mikropilótové steny - pilótové steny - prefabrikované steny - kotvené steny	- ochranné steny, múry - galérie - hĺbené tunely	- záchytné priekopy, valy - valy z vystuženej zeminy

8. Záver

Publikácia Zosuvy na Slovensku prezentuje výsledky najvýznamnejších geologických úloh zameraných na prieskum, monitorovanie a sanáciu svahových porúch, ponúka doposiaľ nepublikované výsledky Atlasu máp stability svahov Slovenskej republiky a prehľad kvantitatívnych metód hodnotenia vzniku svahových deformácií na Slovensku. Samostatná

kapitola je venovaná svahovým deformáciám vzniknutým v roku 2010, nakoľko v tomto z hľadiska inžinierskej geológie mimoriadnom roku bolo zaznamenaných až 577 nových, príp. reaktivizovaných zosuvov, ktoré, okrem iného, vyvolali aj mimoriadnu mediálnu pozornosť. Metodická časť publikácie približuje čitateľovi súčasné metódy inžinierskogeologického prieskumu svahových deformácií, metódy monitorovania a sanácie zosuvných svahov a ponúka príklady aplikácie niektorých metód v praxi.

Publikácia Zosuvy na Slovensku je určená odbornej verejnosti, hlavne inžinierskym geológom a geotechnikom a poslúžiť by mohla aj zástupcom štátnej správy a verejnej správy, hlavne starostom obcí, ktorí pôsobia v oblastiach náchylných na svahové deformácie a ktorí často musia riešiť mimoriadne situácie spojené so zosuvmi. Informácie obsiahnuté v publikácii môžu byť zároveň vhodným zdrojom poznatkov aj pre širokú laickú verejnosť.

Poďakovanie

V mene autorov publikácie by sme radi poďakovali pracovníkom Slovenskej agentúry životného prostredia za možnosť zostaviť a vydať túto publikáciu a za koordináciu pri jej tvorbe. Vďaka patrí aj spolupracovníkom zo Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra, z Prírodovedeckej fakulty UK, zo Stavebnej fakulty STU, Sekcie geológie a prírodných zdrojov Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky a zo súkromných geologických spoločností. Osobitne ďakujeme recenzentovi prof. RNDr. Františkovi Baliakovi, PhD. za starostlivé prečítanie rukopisu a za jeho cenné rady, podnety a pripomienky.

Zoznam literatúry

Baliak, F., Mahr, T., Malgot, J., 1979: Svahové pohyby v karpatskom flyši na Slovensku – etapová správa. Úloha: Zákonitosti svahových deformácií v rôznych geologických štruktúrach Slovenska. Bratislava: SF SVŠT, 67 s., 6 príl., 1 d.

Bednarik, M., Pauditš, P., Ondrášik, R., 2014: Rôzne spôsoby hodnotenia úspešnosti máp zosuvného hazardu: bivariačný verzus multivariačný štatistický model. Acta Geologica Slovaca (AGEOS), 6 (1), 2014, s. 71-84.

Drusa, M., Decký, M., Marschalko, M., Zgútová, K., Trojanová, K., Vangel, J., Kubík, B., Starší, B., 2013: Navrhovanie a kontrola zemných konštrukcií dopravných stavieb, Edis Žilinskej univerzity, 522 s. ISBN 978-80-554-0823-1.

Grenčíková, A., Žabková, E., 2002: Prehodnotenie svahových deformácií najzraniteľnejších území flyšového pásma Západných Karpát orientačný IGP. Bratislava: MŽP SR, Žilina: INGEO, 41 s., 34 príl., 2 d.

Grman, D., Boszáková, M., Magdošková, M., Takáč, P., Wanieková, D., Žec, B., Balážová, R., Hajduková, J., Syčev, V., Udič, M., Stercz, M., Žurbej, J., Bednarik, M., Laho, M., Liščák, P., Páleník, Mil., Páleník, Mich., Sluka, V., Smolka, J., Smolka, M., Šimeková, J., Farkašovský, R., Jacko, S., Janočko, J., 2011: Inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií v najohrozenejších územiach flyšového pásma v M 1:10 000, orientačný inžinierskogeologický prieskum, záverečná správa, GEO Slovakia, Košice.

Jadroň, D., Záthurecký, A., Baliak, F., Grenčíková, A., Fussgänber, E., Kopecký, M., Malgot, J., Sluka, V., Smoleňák, J., Žabková, E., Andrisková, O., Coplák, M., Demian, M., Hudák, J., Holeša, Š., Kubiš, M., Matejček, A., Mokrá, M., Rusnák, M., Solčiansky, R., Svrčková, A., Vantruba, M., Vlček, M., 2005: Zhodnotenie efektívnosti prieskumno-sanačných prác a účinnosti stabilizačných opatrení na zosuvoch v rôznych geologických

štruktúrach Slovenska, orientačný IGP. Bratislava MŽP SR, Žilina INGEO-ighp. 49 s., 137 príl., 1 d.

Jelínek, R., 2005: Deterministický prístup pri hodnotení hazardu Ľubietovského zosuvu. In. Miner. Slov., roč. 37, č. 1, ISSN 0369-2086, s. 65-74.

Jelínek, R., Wagner, P., 2007: Landslide hazard zonation by deterministic analysis. (Veľká Čausa landslide area, Slovakia). In Landslides. ISSN 1612-510X, 2007, roč. 4, č. 4, s. 339-350.

Kopecký, M., Martinčeková, T., Šimeková, J., Ondrášik, M., 2008: Atlas zosuvov – výsledky riešenia geologickej úlohy. In: Frankovská, J., Liščák, P. & Ondrášik, M. (eds.): Geology and the environment. Proceed. of 6th Conf., SAIG, Bratislava, s. 105-110.

Kováčik, M., Kováčiková, M., 1987: Prognóza vzniku svahových deformácií v oblasti stredného Považia (JZ časť Javorníkov), čiastková záverečná správa. GÚDŠ, 1987. 22 s., 4 príl., 1 d.

Kraľovičová, L., Bednarik, M., Trangoš, I. & Jelínek, R., 2014: Landslide Hazard Assessment Using Deterministic Analysis – a Case Study from the Chminany Landslide, Eastern Slovakia. Slovak Geol. Mag., 1/2014, Dionýz Štúr State Geological Institute, s. 79-88.

Liščák, P., Pauditš, P., Petro, Ľ., Iglárová, Ľ., Ondrejka, P., Dananaj, I., Brček, M., Baráth, I., Vlačiky, M., Németh, Z., Záhorová, Ľ., Antalík, M., Repčiak, M., Drotár, D., 2010: Registration and evaluation of newly evolved slope failures in Prešov and Košice regions in 2010. In: Miner. Slov., roč. 42, s. 393-406.

Masný, M., Vrábeľ, P., Peterková, M., Gejdoš, T., Slivovský, M., Ižvolt, L., Mušková, M.,1997: Okres Dolný Kubín – pasportizácia svahových deformácií vo vzťahu k cestnej a železničnej sieti a k trasám hlavných produktovodov Stredoslovenského kraja a vybraných okresov (BJ, HN, SK, TV) Východoslovenského kraja, orientačný prieskum, čiastková ZS. Bratislava: MŽP SR, Žilina: INGEO, 1997. 27 s., 62 príl., 2 d.

Modlitba, I., Kováčik, M., Ivanička, J., Klinec, A., 1987: Prognóza vzniku svahových deformácií v Breznianskej kotline, čiastková záverečná správa. GÚDŠ Bratislava. 41 s., viaz. príl., 1 d.

Nemčok, A., Pašek, J., Rybář, J., 1974: Dělení svahových pohybů. In: Sborník geol. věd. Ř. HIG Praha, roč. 11, s. 77-93.

Nemčok, A., Baliak, F., Mahr, T., Malgot, J., 1977: Svahové pohyby v neovulkanických pohoriach Slovenska. Manuskript. Geofond, Bratislava.

Nemčok, A., 1982: Zosuvy v slovenských Karpatoch. Bratislava. Veda, 319 s.

Pauditš, P., 2006: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Geol. Práce, Správy 112, ŠGÚDŠ, Bratislava, s. 41-58.

Petro, L., Frankovská, J., Matys, M., Wagner, P. (eds.), Bednarik, M., Grunner, K., Holzer, R., Hrašna, M., Hulla, J., Jánová, V., Kováčik, M., Kováčiková, M., Liščák, P., Modlitba, I., Ondrášik, M., Ondrášik, R., Pauditš, P., Slivovský, M., Vlčko, J., 2008: Inžinierskogeologický a geotechnický terminologický slovník. ŠGÚDŠ, Bratislava. 465 s. ISBN: 978-80-88974-99-4.

Spišák, Z., Polaščinová, E., Kaličiak, M., Karoli, S., 1987: Vplyv geologickej stavby územia na vznik a rozvoj svahových deformácií v severnej časti Košickej kotliny a Slanských vrchov. Bratislava. GÚDŠ. 66 s., 10 príl., 1 d.

Šimeková, J., Martinčeková, T., Abrahám, P., Gejdoš, T., Grenčíková, A., Grman, D., Hrašna, M., Jadroň, D., Záthurecký, A., Kotrčová, E., Liščák, P., Malgot, J., Masný, M., Mokrá, M., Petro, Ľ., Polaščinová, E., Solčiansky, R., Kopecký, M., Žabková, E., Wanieková, D., Baliak, F., Caudt, Ľ., Rusnák, M., Sluka, V., 2006: Atlas máp stability svahov SR v M 1:50 000, orientačný IGP. MŽP SR, INGEO-ighp, Katedra geotechniky SvF STU, ŠGÚDŠ, GEOKONZULT, PriF UK.

VÝZNAMNÉ ZOSUVY V TRASE DIAĽNICE D1

SIGNIFICANT LANDSLIDES ON THE D1 HIGHWAY ROUTE

Miloslav Kopecký, Martin Ondrášik, Jana Frankovská, Martin Brček[1], Jakub Panuška[2]

[1]Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: miloslav.kopecky@stuba.sk
[2]PanGEO s.r.o., Pražská 1451/15, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, e-mail:panuska.geotech@gmail.com

Abstrakt: Zosuvy podstatnou mierou ovplyvňujú projektovanie a výstavbu diaľničných stavieb. V článku sú rozobrané zosuvy na najdlhšej slovenskej diaľnici D1, ktoré významným spôsobom ovplyvnili jej prípravu, výstavbu, alebo prevádzku. Sú analyzované predovšetkým tie zosuvy, pri ktorých došlo až k zmene trasy diaľnice, a to či už pred výstavbou, alebo počas nej. Taktiež je poukázané na prípady výskytu neočakávaných zosuvov, alebo na prípady neočakávanej aktivity zosuvov počas výstavby, kedy bolo nutné prehodnotiť pôvodné zabezpečenie trasy diaľnice.

Abstract: Landslides significantly affect the design and construction of highway structures. The article discusses landslides on the longest Slovak highway D1, which have significantly affected its preparation, construction or operation. In particular, those landslides where the route of the motorway has changed have been analysed, either before or during construction. It also points to cases of unexpected landslides, or cases of unexpected landslide activity during construction, when it was necessary to reconsider the original security of the highway.

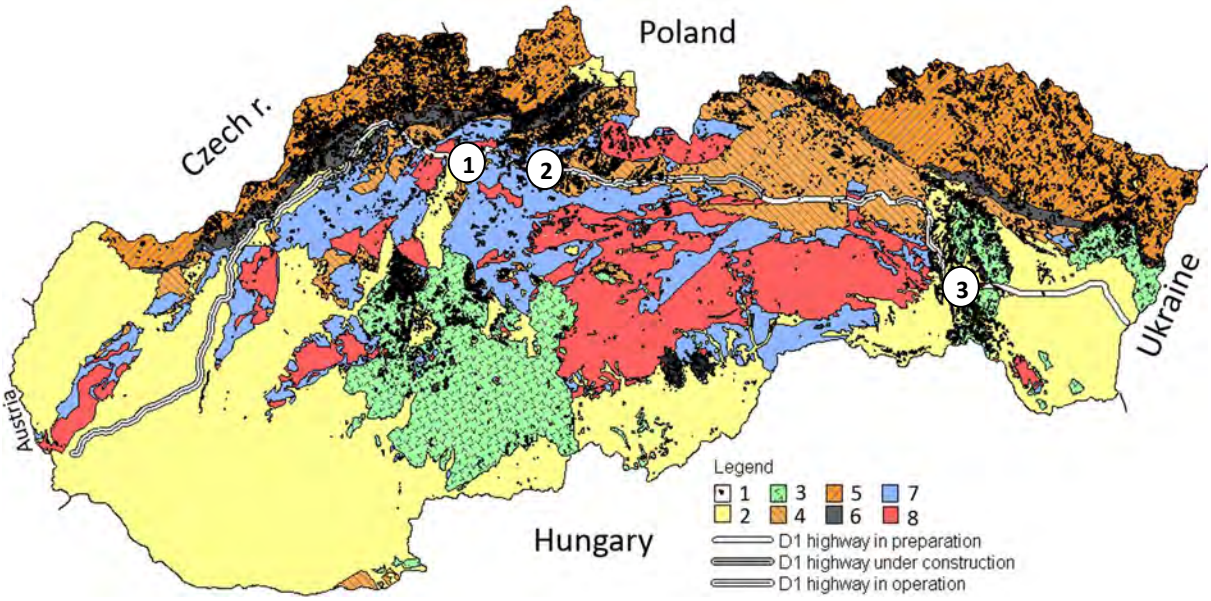
Kľúčové slová: zosuvy, zmena trasy diaľnice, sanácia zosuvov, aktivita zosuvov

Key words: landslides, change of motorway route, landslide remediation, landslide activity

1. Úvod

D1 je diaľnica križujúca Slovenskú republiku zo západu na východ so začiatkom v Bratislave a plánovaným ukončením na slovensko-ukrajinskej hranici. Je súčasťou V.A Paneurópskeho koridoru (Terst) – Bratislava – Žilina – Košice – Užhorod – (Ľvov) (https://sk.wikipedia.org/). Ide o najdlhšiu diaľnicu na Slovensku (516 km), ktorej výstavba sa začala pred 50 rokmi. Trasa D1 prechádza rozmanitými geologickými jednotkami. Práve geologická stavba a geomorfologický vývoj územia vytvorili v mnohých oblastiach Slovenska vhodné podmienky pre výskyt značného množstva svahových deformácií (obr.1).

Podľa najnovších údajov je zosuvmi postihnutých až 5,25 % plochy Slovenska (Kopecký a kol., 2008). Z uvedeného je zrejmé, že líniová stavba, akou je diaľnica D1, je zosuvmi výrazne ovplyvnená. Technicky najnáročnejšími a finančne najnákladnejšími úsekmi sú práve tie, ktoré vedú zosuvnými územiami.



1 Zosuvy, 2 Neogénne a kvartérne sedimenty, 3 Neogénne vulkanity, 4 Vnútorné flyšové pásmo, 5 Vonkajšie flyšové pásmo, 6 Bradlové pásmo, 7 Sedimenty mezozoika – prevažne vápence a dolomity, 8 Kryštalické horniny

1 Landslides, 2 Neogene and Quaternary deposits, 3 Neogene volcanic rocks, 4 Inner-Carpathian Paleogene rocks (flysch formations), 5 Paleogene rocks of outer Carpathian zone (flysch formations), 6 Paleogene and Mesozoic rocks of Klippen Belt (mostly limestones folded into flysch formations), 7 Mesozoic rocks (folded sedimentary rocks), 8 Crystalline rocks (intensively disturbed)

Obr. 1 Trasa diaľnice D1 vo vzťahu ku geologickej stavbe Slovenska a svahovým deformáciam s vyznačením opisovaných lokalít
Fig. 1 D1 Highway line in relation to the geological setting of Slovakia and slope failures with the described localities appointed by the marks.

Pretože zosuvy predstavujú významné riziko, pri projektovaní a následnej výstavbe sa im venuje prvoradá pozornosť. V ďalších kapitolách sú prezentované niektoré významné zosuvné územia na trase D1.

2. Zosuvy ovplyvňujúce zmenu trasy D1

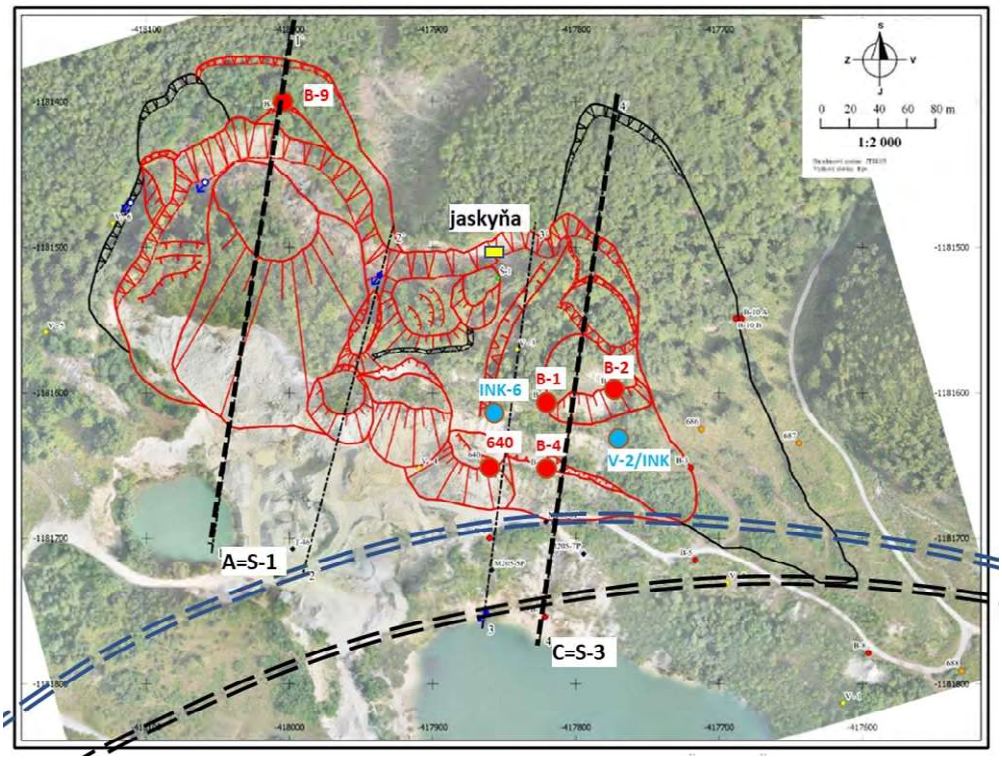
V kapitole podávame príklady zosuvov, ktoré ovplyvnili zmenu trasy diaľnice D1 počas jej projektovej prípravy a aj výstavby.

2.1 Kraľoviansky skalný zosuv – zmena trasy D1 Turany-Hubová počas projektovej prípravy – lokalita 1

V marci roku 2013 vznikol v kameňolome Kraľovany-Rieka, známom aj ako lom Šútovo, plošne rozsiahly skalný zosuv. Počiatočný náhly výrazný pohyb bol okrem viditeľného vizuálneho efektu zaznamenaný aj na troch pevných geodetických bodoch inštalovaných NDS. Rozmery zosuvu sú 580 m x 280 m (obr. 2). Predpokladaná hĺbka šmykových plôch bola bez prieskumných prác odhadovaná na 30 až 40 m a objem zosunutých más 2 000 000 m^3 (Šimeková a kol., 2014).

Maximálny horizontálny pohyb na zosuve pri jeho vzniku v marci 2013 bol odhadnutý na 43 m. Významné ohrozenie znamenal zosuv nielen pre ťažbu kameňa a rekreačné účely, ale hlavne pre výstavbu trasy diaľnice D1 Turany – Hubová (obr.1), ktorá bola plánovaná

pred vznikom zosuvu v časti čela zosuvu (obr. 2 – modrá čiara). Po vzniku zosuvu bol jeden z variantov novej trasy naplánovaný južnejšie (obr. 2 – čierna čiara – variant V-1).



Obr. 2 Skalný zosuv s plánovanou trasou diaľnice pred (modrá čiara) a po vzniku zosuvu (čierna čiara – variant V1) – upravené podľa Šimeková, Liščák a kol., 2014
Fig. 2 Rockslide with two alternative routes of the highway, before (blue line) and after the rockslide (black line – variant V1) – adapted according to Šimeková, Liščák a kol., 2014

Ako rozhodujúci predpoklad (podmienku) pre vznik skalného zosuvu veľkých rozmerov považujeme geologicko-tektonickú predispozíciu. V danom území vystupuje násunová línia, kde na granity boli nasunuté mezozoické horniny prevažne charakteru dolomitov a porušených vápencov. Násunová línia medzi granitmi a dolomitmi má strmý sklon k juhu až juhozápadu a predstavuje hlavnú odlučnú oblasť celého zosuvu (obr. 3). Granity sú v oblasti násunovej línie charakteru mylonitov (íly so strednou až vysokou plasticitou) a práve prítomnosť mylonitov umožnila pohyb dolomitov po tejto vrstve s výrazne nízkou pevnosťou. Za ďalší predpoklad pre vznik zosuvu považujeme viac ako 50-ročné ťažobné aktivity v kameňolome, ktoré výrazne oslabili pätu svahu. Uvedené skutočnosti vytvorili vhodné podmienky pre vznik rozsiahleho skalného zosuvu.

Rozhodujúcou príčinou (spúšťačom) svahového pohybu boli extrémne klimatické podmienky v zime a na jar v roku 2013. Opakovaným oteplením dochádzalo k viacnásobnému topeniu snehovej pokrývky a nasýteniu horninového prostredia dolomitov vodou. Rozhodujúcou príčinou bolo roztopenie hrubej snehovej pokrývky v marci a vniknutie roztopenej vody do otvorených trhlín v odlučnej oblasti zosuvu („Rozsadlinová“ jaskyňa obr. 2).

Obr. 3 Odlučná hrana zosuvu v jeho centrálnej časti (detail šmykovej plochy v mylonitoch)
Fig. 3 Crown of the rockslide with the sliding surface in the central part of the rockslide (detail of sliding surface in mylonites)

Monitorovacími aktivitami (geodetické a inklinometrické merania) bolo potvrdené v roku 2013, že zosuv je stále aktívny, pričom napr. geodetický bod NDS vykazoval pohyb cca 9mm za deň (Fraštia a kol., 2014). Pokračujúca aktivita na zosuve vyvolala potrebu posúdiť stabilitu navrhovanej posunutej trasy diaľnice vo variante V-1 (Kopecký a kol., 2021).

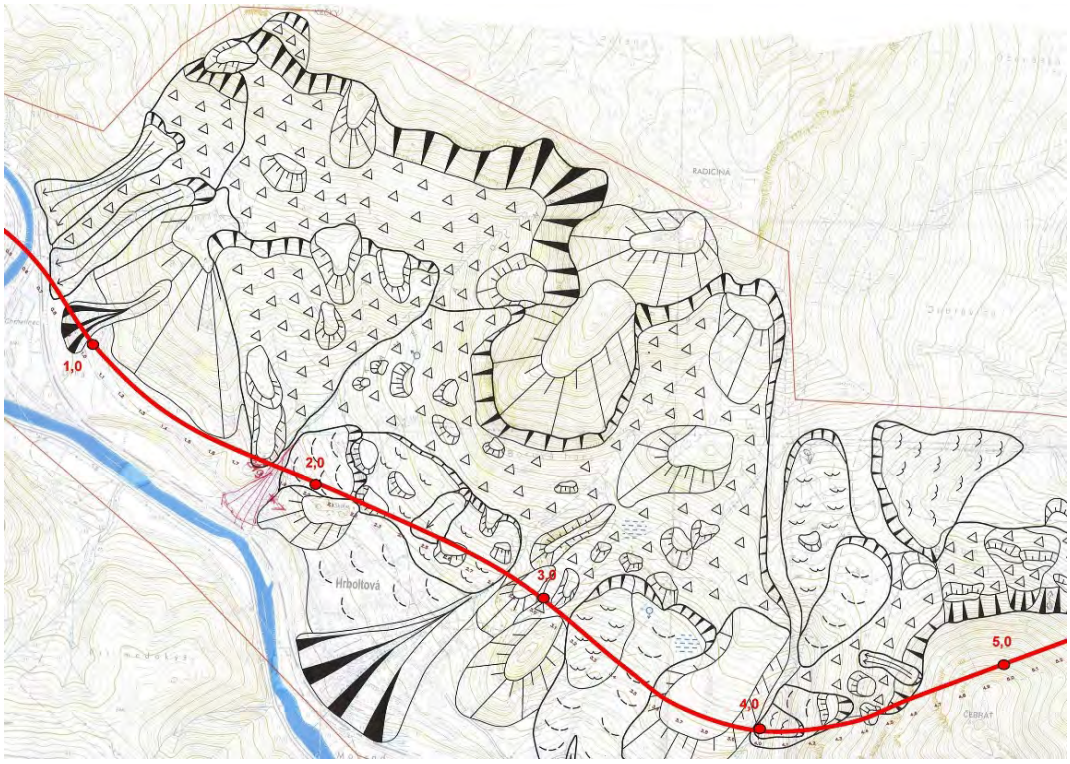
Stabilitnými výpočtami bolo zistené, že stabilizáciu zosuvu nad trasou diaľnice nie je možné vykonať silovými opatreniami, ale výhodnejšie by to bolo formou priťažovacej lavice značných rozmerov (Novotný, Novotná, 2014).

Komplikovaným, niekoľko ročným procesom posudzovania vplyvu navrhovanej činnosti bol ako finálne riešenie diaľnice D1 Turany – Hubová zvolený variant V2 s tunelom Korbeľka. V súčasnosti prebieha na uvedený tunelový variant posúdenie v zmysle čl. 4.7. Rámcovej smernice o vode. Jedným z dôležitých faktorov, ktorý toto rozhodnutie ovplyvnil, bol práve vznik tzv. kraľovianskeho zosuvu.

2.1 Zosuvné územie nad Hrboltovou – zmena trasy D1 Hubová-Ivachnová počas výstavby – lokalita 2

Úsek trasy diaľnice D1 na strednom Slovensku je vedený územím s výskytom extrémne hlbokých svahových deformácií. Rizikovým je najmä úsek v km 2,0-4,0, kde mala byť trasa vedená po povrchu formou zárezov, násypov a mostov. Celkový plošný rozsah zosuvného územia v uvedenom úseku je cca 2 x 2 km a vzdialenosť medzi najvyššími časťami svahových deformácií a trasou D1 je až 1 500 m (obr. 4). Svahové deformácie, ktoré sú vyvinuté takmer na celom predmetnom svahu (od údolia Váhu až po hrebeň vrchov) sú rôzneho charakteru a rôzneho stupňa aktivity. Vývoj jednotlivých foriem svahových deformácií bol viazaný na erózne bázy rieky Váh pri jej postupnom zahlbovaní sa a vytváraní údolia. Geologická stavba tu umožnila vznik obrovských svahových deformácií. Pevnejšie dolomity a vápence (vrcholové partie svahu) ležia na „mäkších“ slieňovcoch (spodné miernejšie časti svahu). Plastický charakter slieňovcov umožnil gravitačný pohyb blokov dolomitov a vápencov po svahu. Približne na kontakte dolomitov a slieňovcov sa vytvorili

blokové polia, kde sa veľké bloky vápencov a dolomitov zabárajú a plávajú v slienitých vápencoch. Takto mohli „odcestovať“ pomerne veľké bloky hornín (hrúbka aj cez 50 m) po svahu na vzdialenosť aj 500 m (obr. 4).



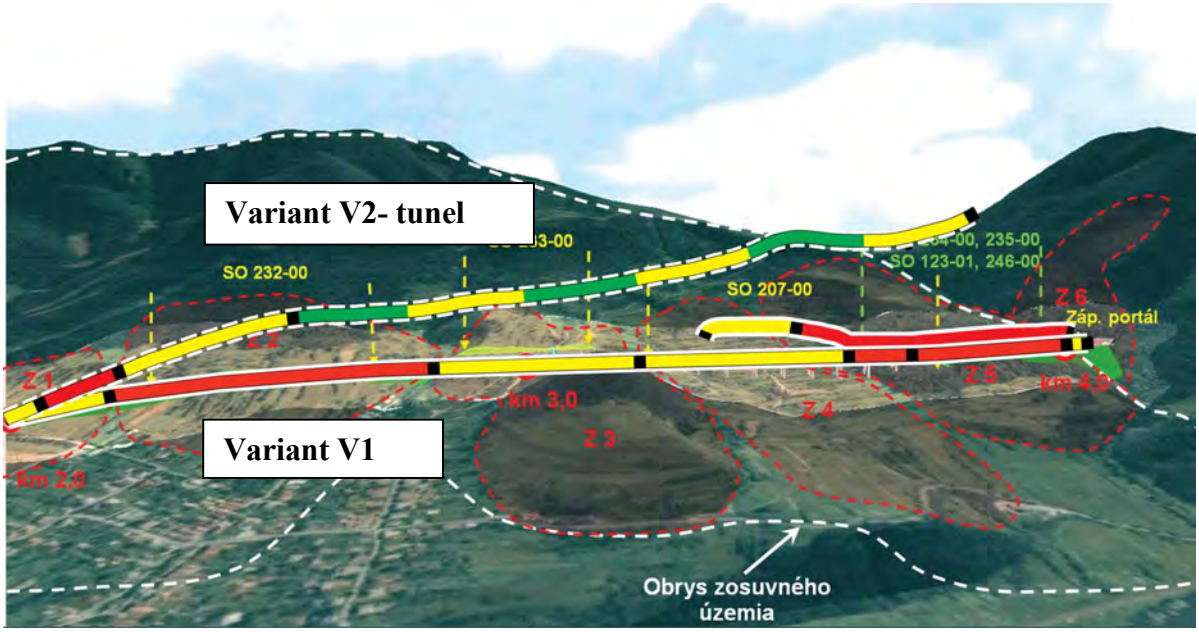
Obr. 4 Rozsah svahových deformácií na trase D1(červená čiara) v km 1,0-4,0 (Malgot, Baliak, Kopecký, 2006)

Fig. 4 Extent of slope deformations on route D1 (red line) in km 1.0-4.0 (Malgot, Baliak, Kopecký, 2006)

Počas výstavby diaľnice od roku 2013 došlo k spresňovaniu informácií o aktivite a plošnom a hĺbkovom rozsahu zosuvov v pôvodnej trase D1 v km 2,0-4,0. Ako preukázali merania podpovrchových pohybov, aj bez stavebného zásahu naďalej pokračovala aktivita svahových pohybov a tak bola veľká pravdepodobnosť, že pri stavebnom zásahu v pôvodnom projektovom zásahu (zárezy do 25 m) by došlo k aktivizácii svahových pohybov aj po hlbších šmykových plochách (až do 40 m). Na základe aktualizovaných informácií bolo postupne menené projekčné riešenie a rozsah sanácie zosuvného územia. Analýzou bolo overené, že návrh sanácie zosuvov na zabezpečenie stability trasy diaľnice podľa pôvodného projektu by bol neúčinný a miestami až nerealizovateľný (Kopecký, 2015).

Z toho dôvodu sa začalo uvažovať s opustením pôvodného variantu vedeného po povrchu (variant V1) a presunúť trasu vyššie a hlbšie do masívu, aby tak došlo k obídeniu (vyhnutiu sa) zosuvným územiam tunelovým variantom (variant V2). Jedným z kritérií pre výber vhodného variantu bolo posúdenie oboch variantov rizikovou analýzou.

Na základe vykonanej rizikovej analýzy (Kopecký a kol., 2018), s ohľadom na enormné riziko výstavby pôvodnej povrchovej trasy V1 (obr. 5), bolo odporúčané v tomto úseku nahradiť povrchový variant V1 tunelovým variantom V2.



Obr. 5 Schematické znázornenie zosuvných území a rozloženie celkového stupňa rizika v trasách variantov V1 a V2 (priemet na povrch) zelená – 1 a 2. stupeň rizika, žltá – 3. a 4. stupeň rizika, červená – 5. stupeň rizika

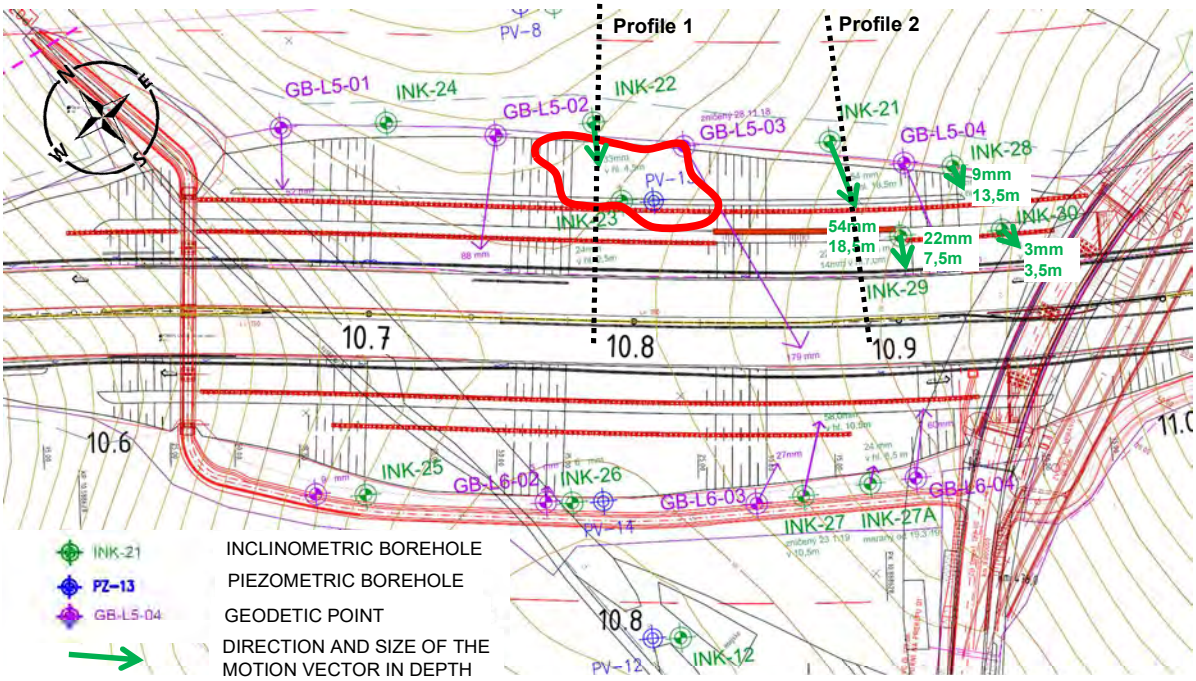
Fig. 5 Schematic representation of landslide areas and distribution of the overall degree of risk in the routes of variants V1 and V2 (projection to the surface) green – 1st and 2nd degree of risk, yellow – 3rd and 4th degree of risk, red – 5th degree of risk

V zmysle uvedeného odporúčania sa v súčasnosti realizuje D1 v zmenenej trase s predĺženým tunelom Čebrať.

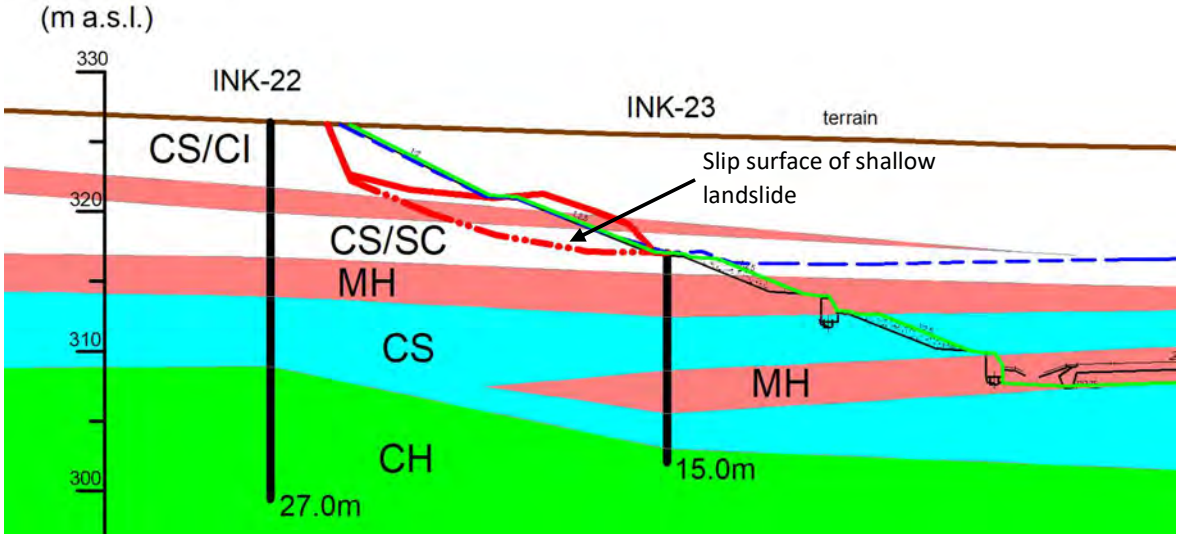
3. Fosílne zosuvy ovplyvňujúce technické riešenie (zabezpečenie) trasy D1 počas výstavby – trasa D1 Budimír – Bidovce – lokalita 3

V trase diaľnice D1 Budimír – Bidovce bolo počas inžinierskogeologického prieskumu terénnym mapovaním vyčlenených viacero zosuvných území. Najväčšie problémy s nestabilitou svahov však boli pri výstavbe zaznamenané v oblasti hlbokého zárezu, kde sa na základe morfologického hodnotenia územia prítomnosť zosuvov neočakávala (Lenková a kol., 2011).

Trasa diaľnice D1 je v problematickom úseku vedená zárezom dĺžky cca 400 m (km 10,6-11,0 – obr. 6) s hĺbkou cca 17 m. Výstavba zárezu prebiehala v neogénnych sedimentoch prevažne v ílovitom vývoji s polohami pieskov a štrkov. V spodných častiach neogénneho súvrstvia vystupujú sedimenty charakteru slabo spevnených tufitických pieskovcov. Na obr. 7 podávame zjednodušený geotechnický profil zárezom v km 10,775. Realizácia zárezu bola naprojektovaná so sklonmi 1:2,5 a s kotvenými betónovými prahmi v päte zárezu. Zárez sa začal hĺbiť od km 11,0. S postupným hĺbením zárezu na hĺbku cca 12 m dochádzalo najmä na ľavej strane k vzniku plytších zosuvov (obr. 6 a 7).



Obr. 6 Zárez v km 10,6-11,0. Situovanie inklinometrov a geodetických bodov v zároveň a vektory a veľkosť pohybu v relevantnej hĺbke (červená čiara – aktívny plytký zosuv)
Fig. 6 Highway cut at 10.6–11.0 km showing inclinometer (INK) and geodetic points (GB) locations, vectors, and movements at relevant depths (red line = active landslide)



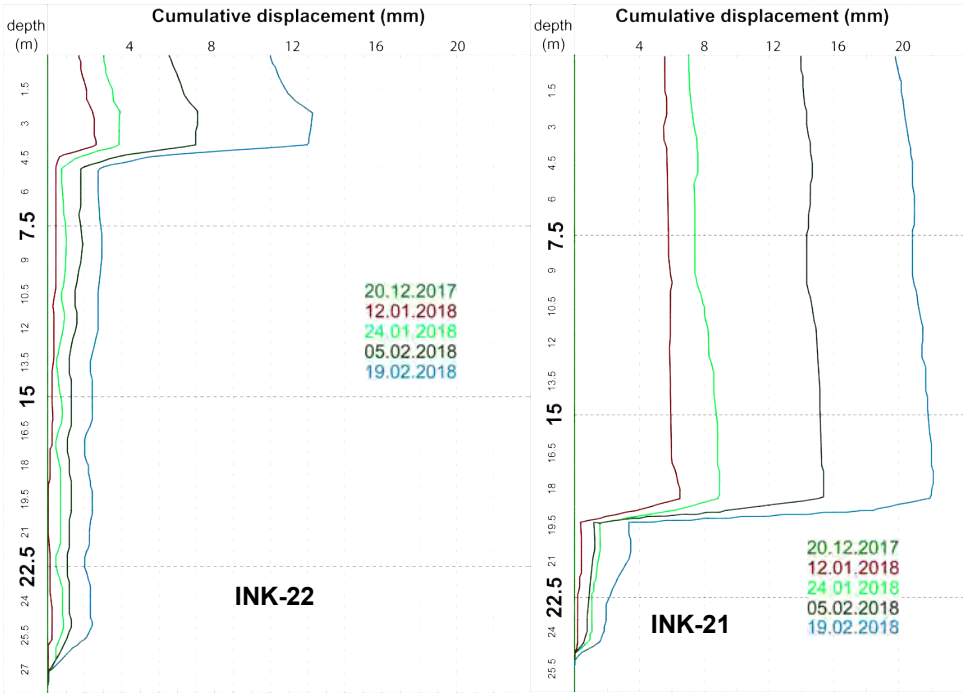
Obr. 7 Zjednodušený geotechnický profil 1 v km 10,775 – dočasný výkop (modrá línia) a projektovaný výkop (zelená čiara)
Fig. 7 Simplified geotechnical profile 1 at 10.775 km showing the temporary excavation (blue line) and design excavation (green line)

Vo vykopanom svahu zárezu okrem výskytu plytkých zosuvov boli aj vizuálne pozorované odkryvy šmykových plôch (obr. 8), ktoré naznačovali prítomnosť starých fosílnych zosuvov (Kopecký a kol., 2020).

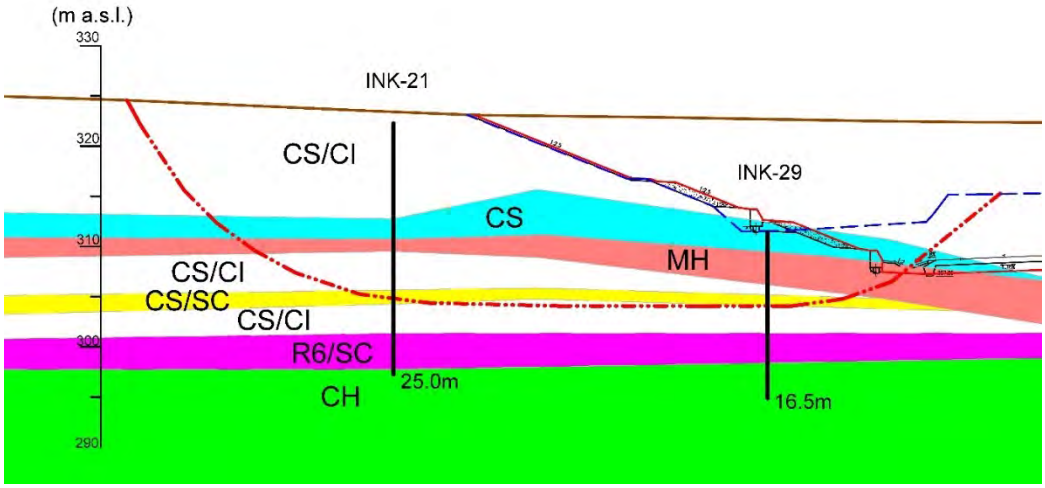
Obr.8 Priebeh šmykových (oslabených) plôch vo výkope zárezu
Fig. 8 Slip surfaces in the excavation of the cuts and the excavated shaft

S ohľadom uvedený výskyt prvých zosuvov na svahu bol v celom záreze doplnený monitorovací systém o 7 inklinometrov (INK-21 až 27) a 2 piezometre (obr. 6).

Rozhodujúcou informáciou o globálnej stabilite svahu zárezu bolo zistenie, že v inklinometri INK-21 (km 10,85) dochádza k pohybu na šmykovej ploche v hĺbke cca 17,7 m p.t. (obr. 9), čo by odpovedalo kontaktu ílovitého štrku a podložných ílov a teda tu dochádzalo k využitiu starej oslabenej plochy (obr. 10). K uvedenej nestabilite vo svahu dochádzalo už v čiastočne vykopanom záreze (modrá čiara – obr. 10). Do realizovania definitívneho tvaru svahu zárezu zostávalo vykopať ešte 7 m. Pohyb v INK-21 mal taktiež zrýchľujúcu tendenciu (obr. 9).



Obr. 9 Čiary kumulatívneho posunu získané pomocou inklinometrov INK-21 a INK-22 v zárezе diaľnice za obdobie od decembra 2017 do februára 2018.
Fig. 9 Cumulative displacement curves obtained by the inclinometers INK-21 and INK-22 in the road cut for the period from December 2017 to February 2018.



Obr.10 Profil 2 v km 10,850 s vyznačením šmykovej plochy (červená čiara). Modrá čiara – úroveň výkopu

Fig. 10 Profile 2 Slip surface at 10.85 km (red line). Blue line = a level of temporary excavation

Výsledky z inklinometrických meraní potvrdili existenciu hlbších porúch vo svahu zárezu. Najväčšie pohyby boli zistené v inklinometri INK-21, cca v hĺbke 18,0 m p.t., pričom pohyb mal zrýchľujúci charakter.

Z uvedeného dôvodu sa ďalšie hĺbenie zárezu zastavilo na cca 9 mesiacov a analyzovala sa stabilita svahov zárezov s vypracovaním prognózy ďalšieho vývoja po obnovení výkopových prác.

Geotechnickým monitoringom a stabilitnými výpočtami bolo overené, že pôvodne navrhované zabezpečenie svahov zárezov (betónové prahy s kotvami) nie je možné ohľadom na aktivizáciu pomerne hlbokých fosílnych zosuvov zrealizovať.

Výpočtami bolo preukázané, že ak by sa pokračovalo vo výkopových prácach, došlo by ku kolapsu svahov zárezu.

Preto sa navrhol a zrealizoval nový spôsob zabezpečenia svahov zárezov pomocou dvojradovej kotvenej pilótovej steny a až následne sa pokračovalo vo výkopových prácach. V súčasnosti nevykazuje svah zárezu žiadne známky porušenia.

4. Záver

Pri výstavbe ciest a diaľnic sa často aktivizujú zosuvy a spôsobujú vážne problémy. Na Slovensku je zosuvmi ohrozených 670 km vybudovanej cestnej siete a 67 km železničných trás (Kopecký a kol., 2008). V súčasnosti realizovaná diaľničná sieť na Slovensku je budovaná v prostredí s častými zosuvmi, kedy došlo počas ich aktivizácie aj k zmene trasy počas výstavby. Najväčšie riziko pri budovaní dopravných stavieb v zosuvnom území predstavuje zásah do telesa zosuvu formou zárezu. Vtedy často dochádza nielen k ohrozeniu samotnej trasy dopravnej stavby, ale aj jej širšieho okolia.

V článku sú prezentované 3 prípady, kedy sa v dôsledku výskytu aktívnych zosuvných území musela meniť trasa diaľnice, prípadne riešenie technického zabezpečenia.

Najnepriaznivejšia situácia s ohľadom na výskyt zosuvov je na úseku Turany-Ivachnová (lokality 1 a 2 – obr. 1). Na uvedenom úseku o dĺžke 22,5 km (bez tunelov) bolo vyčlenených 24 zosuvných území, ktoré zasahujú až 35% uvedeného úseku (7,9 km). Odráža sa to na tom, že úsek D1 Turany-Hubová nie je doteraz projekčne pripravený a úsek Hubová-Ivachnová sa stavia už takmer 10 rokov a stále nie je dokončený.

V kapitole podávame príklad výskytu fosílnych zosuvov v záreze D1 na trase Budimír – Bidovce, ktoré ovplyvnili zmenu technického riešenia (zabezpečenia) trasy D1 počas výstavby.

Z uvedeného vyplýva, že je veľmi dôležité venovať sa problematike výskytu zosuvov už v prvých etapách prieskumu pre dopravné stavby. To si však vyžaduje, aby tieto riešili erudovaní odborníci s dlhodobými skúsenosťami. Nemenej dôležité je v zosuvných územiach ohrozujúcich trasu dopravných stavieb už pri prvých etapách prieskumu vybudovať monitorovací systém. Tento poskytne dostatok relevantných údajov pre optimálnu úpravu trasy, prípadne jej adekvátne zabezpečenie ešte v etape projektovania.

Poďakovanie

Príspevok je jedným z výstupov grantovej úlohy č. 1/0745/21 agentúry VEGA

Zoznam literatúry

Fraštia, M., Marčiš, M., Kopecký, M., Liščák, P., Žilka, A., 2014: Complex geodetic and photogrammetric monitoring of the Kraľovany rock slide. *Journal of Sustainable Mining*. p-ISSN 2300-1364. Volume 13, 2014, s. 12-16

Kopecký, M., Martinčeková, T., Šimeková, J., Ondrášik, M., 2008: Atlas zosuvov. Enviromagazín. Ministerstvo životného prostredia a SAŽR. XIII. Ročník. 5/2008. s. 8 – 9. ISSN 1335-1877

Kopecký, M., Brček, M., Frankovská, J., Ondrášik, M., Fraštia, M., Liščák, P., Novotný, J., 2021: Change of a highway route caused by a rockslide. (2021) A*cta Polytechnica CTU Proceedings*, 29, s. 11-16. ISSN 23365382. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85101639675; DOI: 10.14311/APP.2020.29.0011

Kopecký, M., 2015: Analýza realizovateľnosti projektovanej trasy diaľnice D1 Hubová – Ivachnová v úseku km 2,0-4,0 s ohľadom na súčasnú aktivitu zosuvných území a na bezpečnú prevádzku diaľnice po výstavbe. Záverečná správa. Katedra Geotechniky SvF STU Bratislava. 31 s.

Kopecký, M., Ondrášik, M., Brček, M., Janták, V., 2019: Risk Analysis of the Motorway Routes in Landslides Area. In World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS 2018): Proceedings. 18–22 June 2018, Prague, Czech Republic. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2019, [10] s.

Kopecký, M., Frankovská, J., Panuška, J., 2020: Vplyv aktivizácie fosílnych zosuvov na stabilitu diaľničného zárezu. In *Geotechnika*. Roč. 23, č. 1-2 (2020), s. 3-10. ISSN 1211-913X.

Lenková, M. a kol., 2011: Diaľnica D1 Budimír – Bidovce. Záverečná správa z podrobného IG prieskumu. INGEO Žilina,

Malgot, J., Baliak, F., Kopecký, M., 2006: "Engineering-geological map of slope deformation on route D1 Hubová-Ivachnová, Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Bratislava, 2006

Novotný J., Novotná I., 2014: Zpráva o geotechnickém hodnocení varianty 1 výstavby dálnice D1 v úseku Turany – Hubová v místě sesuvu v rámci projektové dokumentace ve stupni Srovnávací studie, Arcadis Praha, 46 s.

Šimeková, J., Liščák, P., Ondrejka, P., Fraštia, Kopecký, M., Žilka, A., Kováčik, M., Pauditš, P. a Balík, D., 2014: Monitoring pohybovej aktivity havarijného skalného

zosuvu v obci Kraľovany. *Geologické práce*, Správy 122, vyd. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, s. 7 – 27. ISSN 0433-4795. 2014

PRÍKLADY OCHRANY CIVILNEJ INFRAŠTRUKTÚRY PRED GEODYNAMICKÝMI JAVMI TYPU SKALNÉHO RÚTENIA

EXAMPLES OF PROTECTION OF CIVIL INFRASTRUCTURE AGAINST GEODYNAMIC PHENOMENA OF THE ROCK FALL TYPE

Adrián Ilkanič[1]

[1]*ENVIGEO a.s., Kynceľová 2, 974 11 Ban. Bystrica, Slovenská republika, e-mail: ilkanic@envigeo.sk*

Abstrakt: Príspevok prezentuje príklady ochrany civilnej infraštruktúry pred geodynamickými javmi typu skalného rútenia, realizované spoločnosťou ENVIGEO a.s. v období rokov 2017 – 2022 v okresoch Banská Bystrica a Banská Štiavnica. Ide o prezentáciu sanácie nestabilných svahov inštalovanými certifikovanými dynamickými bariérami. Autor na príkladoch troch sanovaných lokalít prezentuje postup sanačných prác od vzniku havarijnej udalosti, cez inžinierskogeologické posúdenie svahu, návrh technického zabezpečenia až po finálnu sanáciu nestabilných svahov.

Abstract: An article presents examples of protection of civil infrastructure from geodynamic phenomena such as rock fall, realized by the company ENVIGEO a.s. in the period 2017 – 2022 in the districts of Banská Bystrica and Banská Štiavnica. It is a presentation of remediation of unstable slopes by installed certified dynamic barriers. The author presents the procedure of remediation works from the occurrence of an emergency event, through engineering geological assessment of the slope, design of technical support to the final remediation of unstable slopes on the examples of three rehabilitated localities.

Kľúčové slová: nestabilné svahy, skalné rútenie, sanácia svahov, dynamická bariéra

Key words: unstable slopes, rock fall, slope rehabilitation, dynamic barrier

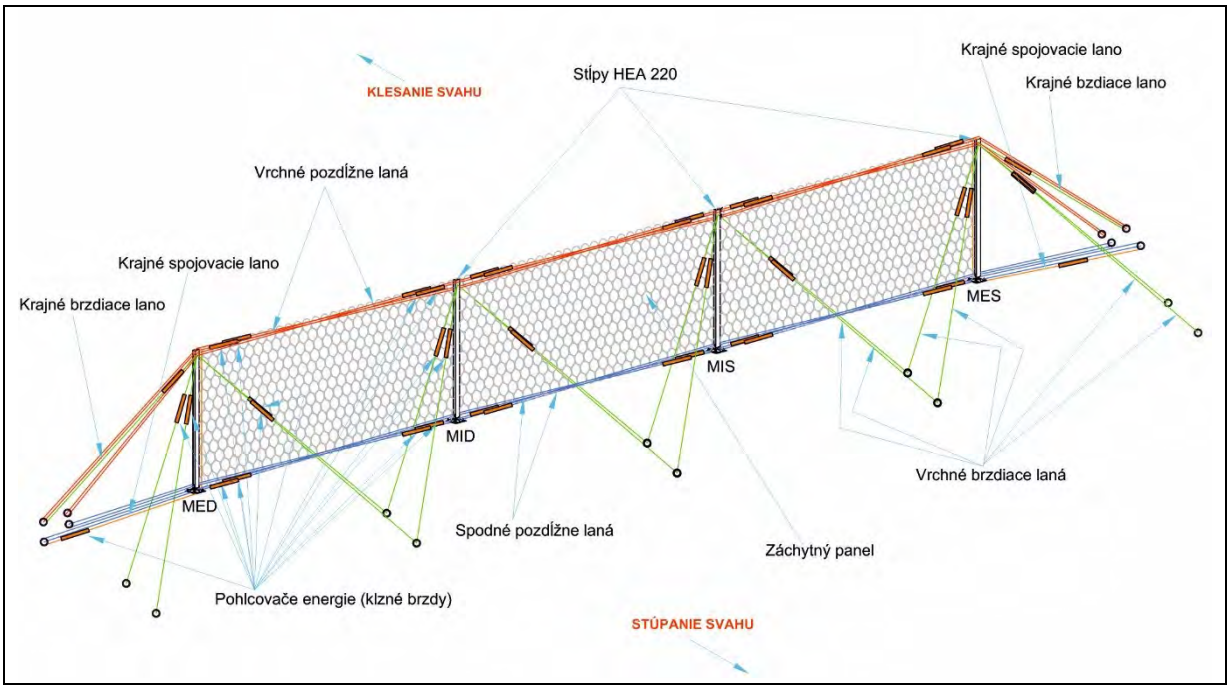
1. Úvod

V období rokov v období rokov 2012 – 2022 sa podieľala spoločnosť ENVIGEO a.s. na inžinierskogeologických prieskumoch a sanáciách nestabilných svahov postihnutých geodynamickými javmi typu rútenia a opadávania skalných balvanov a blokov. Išlo prevažne o svahy ohrozujúce cestné komunikácie a intravilány miest a obcí. V tomto príspevku uvádzame tri príklady sanácie, pri ktorých boli na svahoch navrhnuté a inštalované systémy dynamických bariér proti padaniu skál.

Dynamické bariéry skonštruované na elimináciu účinkov rútenia a opadávania skalných balvanov a blokov pozostávajú z výkyvných oceľových nosníkov pripevnených na ukotvených základových doskách, z nosných a zádržných lán, drôtenej alebo lanovej siete a brzdných prvkov (obr. 1). Energia padajúcich skalných balvanov a blokov je pohltená brzdami bariéry. Pri dopade zo svahu uvoľnených balvanov do bariéry dochádza k premene kinetickej energie na potenciálnu energiu a teplo, súčasne dochádza i k deformácii siete záchytného panelu a bezpečnému zachyteniu skalných úlomkov.

Na prezentovaných lokalitách) boli inštalované bariéry schopné odolať kinetickej energii padajúceho bloku s veľkosťou 1 500 až 3 000 kJ. Všetky bariéry, ktorých inštaláciu

opisujeme v ďalšom texte, boli certifikované podľa ETA (European Technical Approval), majú CE certifikát v zmysle ETAG 027 a Smernice stavebných výrobkov 93/68/CEE.



Obr. 1 Dynamická bariéra proti padaniu skál – schéma (zdroj: MACAFFERRI/sk)
Fig. 1 High resistance rockfall barrier – diagram

2. Lokalita Banská Bystrica – Jakub, ulica Ovocná (2017)

K rúteniu skalných balvanov a blokov na ulici Ovocná došlo v jarných mesiacoch roku 2017. Uvoľnené balvany zasiahli do komunikácie ulice Ovocná, časť z nich poškodila oplotenie objektu rodinného domu.

2.1 Stručná charakteristika lokality

Sanovaný svah sa nachádza medzi železničnou traťou č. 170 (Banská Bystrica – Dolná Štubňa) a komunikáciou ulice Ovocná. Časť územia zaberá skalné bralo so severozápadne orientovanou stenou, výška skalnej steny dosahuje cca 15 m. Nadmorská výška územia je 375 až 408 m n.m. (obr. 2-3). Dĺžka svahov pod skalnou stenou dosahuje 25 až 35 m, sklon svahov pod skalnou stenou je cca 30 až 70°.

Obr. 2-3 Porušená skalná stena na svahu nad ulicou Ovocná
Fig. 2-3 Broken rock wall on the slope above Ovocná street

Masív zdokumentovaný v skalnej stene na svahu nad ulicou Ovocná je budovaný masívnymi hrubo-vrstevnatými vápencami fatranského súvrstvia. Stavba masívu je vrstevnatá, stredne až hrubo-blokovitá, miestami lavicovitá až hrubo-lavicovitá. Horninový masív je prestúpený sieťou diskontinuít, ktoré spôsobujú jeho rozvoľňovanie na prevažne kosouhlé úlomky, balvany a bloky (obr. 4-5).

Obr. 4-5 Porušená časť skalnej steny a vypadnuté skalné balvany a bloky
Fig. 4-5 Broken part of the rock wall and fallen rock boulders and blocks

2.2 Geodynamické javy

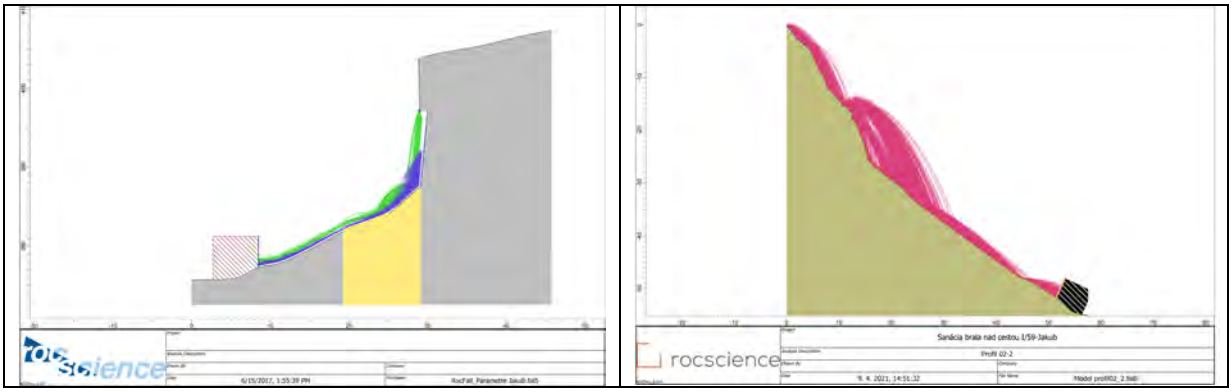
V skalnej stene masívu so sklonom cca 80 – 100° sa nachádza množstvo uvoľnených úlomkov, balvanov a blokov. K ich uvoľňovaniu dochádza v dôsledku existencie tektonicky porušených častí masívu. Intenzita výskytu uvedených javov závisí od klimatických pomerov. Najmä v jarných mesiacoch (marec, apríl) dochádza v území k topeniu snehovej pokrývky, vtekaniu vôd do porušených častí skalného masívu, k zamŕzaniu a rozmŕzaniu vody v otvorených puklinách masívu. Časť skalnej steny je nestabilná, pravdepodobnosť vypadávania a rútenia úlomkov, balvanov a blokov zo steny je vysoká.

2.3 Návrh sanačných opatrení

Inžinierskogeologickým posúdením svahu bola alternatíva stabilizovania (opláštenia) porušenej skalnej steny kotvenými oceľovými sieťami vyhodnotená ako technicky a finančne

náročná. Na ochranu ulice ohrozovanej rútením balvanov a blokov zo svahov bola navrhnutá inštalácia ochrannej záchytnej bariéry umiestnenej pod svahom. Návrh energetickej triedy bariéry bol stanovený výpočtom energie rútenia. Vychádzal z údajov o zdokumentovaných parametroch uvoľnených balvanov a z geodeticky zameraných profilov svahu v predpokladaných trasách pohybu balvanov (obr. 5-6). Výpočty vykonali autorizovaní pracovníci dodávateľskej spoločnosti MACCAFERRI.

V území bola navrhnutá inštalácia dynamickej bariéry typ MACCAFERRI RB 1500/A s dĺžkou 40 m, výškou 4 m a plochou záchytných polí 160 m^2.



Obr. 6-7 Príklady výpočtov energie rútenia pre návrh bariér v lokalitách Jakub (2017) a Jakub (2022)
Fig. 6-7 Examples of energy calculations for barrier design in Jakub (2017) and Jakub (2022)

2.4 Inštalácia dynamickej bariéry

Bariéra bola inštalovaná na úpätí svahu, rovnobežne s líniou komunikácia ulice Ovocná (obr. 8-9). Vrty (s priemerom Ø 90 a 100 mm) pre lanové kotvy a základy pätiek stĺpov bariéry boli vyhotovené pomocou vrtnej súpravy FRASTE, v ťažko prístupných častiach staveniska pomocou prenosnej súpravy LUMESA. Lanové kotvy a kotvy základových pätiek bariéry boli vo vrtoch stabilizované cementovou zmesou. Spolu bolo pri zakladaní objektu bariéry realizovaných 20 vrtov s celkovou dĺžkou 65 m.

Obr. 8-9 Inštalácia dynamickej bariéry na päte svahu
Fig. 8-9 Installing of a dynamic barrier on a slope

3. Lokalita Kozelník (2017-2018)

Dňa 21. 2. 2016 došlo v obci Kozelník (okres B. Štiavnica) k zrúteniu skalného bloku na cestu č. I/51. Skalný blok (s rozmermi 1,5 x 2 x 2 m) uvoľnený zo svahu, prekonal celú

šírku komunikácie. Pohyb bloku zastavilo oceľové zvodidlo (obr. 10). Obhliadku lokality a stručné posúdenie stability svahu realizovali pracovníci ŠGÚDŠ (Jelínek a kol., 2016). V záveroch posúdenia bolo konštatované, že svahová deformácia predstavuje riziko socio-ekonomickej kategórie R3 (vysoké riziko).

3.1 Stručná charakteristika lokality

Sanované územie sa nachádza na východne orientovanom svahu pod kótou Radošovo, v katastri obce Kozelník, nad štátnou cestou I. triedy č. 51, spájajúcou obce Hronská Dúbrava – Kozelník a Banská Belá. Dĺžka svahu, po spádnici je 100 m až 150 m, generálny sklon svahu je 45º až 50º. Výškový rozdiel, medzi úrovňou ohrozenej cesty a zónou, kde dochádza k odtrhnutiu ďalších blokov je 80 – 100 m. V hornej tretine svahov sa nachádza terénny stupeň so stenami a skalnými útvarmi vysokými 3 – 6 m. Časť útvarov je následkom nerovnomerného zvetrávania nestabilná. V tejto časti svahu hrozí uvoľnenie a zrútenie sa blokov s rozmermi > 1 m.

Obr. 10-11 Zásah komunikácie I/59 uvoľneným skalným blokom a miesto vypadnutia bloku zo svahu
Fig. 10-11 Road I / 59 hit by a loose rock block and the block fell off the slope

Svahy sú budované vulkanickými horninami, predovšetkým epiklastickými vulkanickými brekciami a chaotickými brekciami pyroklastických prúdov. Epiklastické brekcie sú tvorené hrubým až blokovým materiálom (priemerná veľkosť 15 – 25 cm až 0,5 m a ojedinele až 2 x 2 m). Matrix hornín je hrubozrnný, piesčitý (často s vysokým obsahom pemzy), lokálne až ílovito-piesčitý. Sporadicky je prítomný materiál starších pyroxénických andezitov. Brekcie pyroklastických prúdov tvoria fragmenty až bloky andezitu priemernej veľkosti 10 – 30 cm, ojedinele bloky do 0,5 m. Matrix je tufový, lokálne silno konsolidovaný až spečený.

Obr. 12 – 13 Porušené a nestabilné skalné útvary na sanovanom svahu
Fig. 12 – 13 Broken and unstable rock formations on the slope

3.2 Geodynamické javy

V opísaných horninách charakteru brekcií sa nachádzajú pevné úlomky a bloky do veľkosti až 2 x 2 x 2 m (obr. 11-13). Ide o horninový materiál s veľmi rozdielnou východiskovou pevnosťou a odolnosťou voči zvetrávaniu. Postupné selektívne zvetrávanie, vypadávanie úlomkov, vyplavovanie a odnos zvetraného materiálu vytvárajú lokálne bralá a nestabilné izolované bloky (obr. 12), ktoré sa za „priaznivých" podmienok môžu zrútiť po svahu. Pravdepodobnosť vypadávania a rútenia sa úlomkov, balvanov a blokov z územia v hornej tretine svahov je vysoká.

3.3 Návrh sanačných opatrení

Po vyhodnotení inžinierskogeologického posúdenia svahu bola v sanovanom území navrhnutá inštalácia ochranných záchytných bariér umiestnených v dvoch líniách približne v polovici svahu. Situovanie bariér v dvoch líniách umiestnených vysoko vo svahu vychádzalo z údajov o zdokumentovaných parametroch uvoľnených balvanov a profile svahu v predpokladaných trasách pohybu balvanov. Zámerom bolo postaviť bariéry v malej vzdialenosti od nestabilných skalných útvarov a eliminovať tak energiu pádu balvanov, ktorá vzrastá úmerne s dĺžkou trasy pádu.

V území bola navrhnutá inštalácia dvoch dynamických bariér typ MACCAFERRI RB 3000/A s energetickou triedou 3 000 kJ. Dĺžka bariér je 2 x 30 m, výška 5 m a plocha záchytných polí dosahuje 300 m^2.

3.4 Inštalácia dynamických bariér

Bariéry boli umiestnené približne v polovici sanovaného svahu (obr. 20). Doprava techniky a materiálu bola z dôvodu neprístupného terénu realizovaná leteckým transportom – ťažkým vrtuľníkom Mi-8AMT prispôsobeným k preprave bremien do hmotnosti 4 000 kg.

Vrty (s priemerom Ø 50 a 100 mm) pre lanové kotvy a základy pätiek stĺpov bariéry boli vyhotovené pomocou vrtnej prenosnej súpravy LUMESA a pneumatických kladív Permon VK-29-5 (obr. 15-16). Realizácia vrtných prác v nedostupnom teréne si vyžadovala budovanie pracovných plošín. Pracovné plošiny montované z trubkového lešenia, vystrojené drevenými doštenými podlahami, boli vo svahu fixované vŕtanými oceľovými kotvami. Spolu bolo pri zakladaní objektu bariér realizovaných 64 vrtov s celkovou dĺžkou 160 m.

Obr. 14-15 Letecký transport materiálu a inštalácia oceľových stĺpov bariér
Fig. 14-15 Air transport of material and installation of steel barrier posts

Oceľové stĺpy bariér boli do svahu inštalované letecky pomocou ťažkého vrtuľníka (obr. 14-15). V sanovanom svahu bolo inštalovaných 8 ks stĺpov. Ukotvenie stĺpov do základových pätiek zo závesu vrtuľníka a ich fixáciu do požadovaného sklonu realizovali špeciálne vyškolení pracovníci.

Obr. 16-17 Realizácia vrtov pre základy pätiek a pre lanové kotvy
Fig. 16-17 Boreholes for foot foundations and for rope anchors

Pre ukotvenie každej z bariér bolo inštalovaných 5 ks vrchných lanových kotiev s dĺžkou 4 m a 4 ks bočných lanových kotiev s dĺžkou 4,5 m. Kotvy sú inštalované do vrtov s priemerom 100 mm vŕtaných v skalnom masíve, fixované sú cementovou zmesou. Vo svahu je inštalovaných 18 ks kotiev s celkovou dĺžkou 74 m.

Obr. 18-19 Inštalácia ochranných sietí a nosných lán bariér
Fig. 18-19 Installation of safety nets and barrier ropes

Inštalácia pozdĺžnych, krajných a spojovacích lán bariér, ochranných sietí a inštalácia pohlcovačov energie bola realizovaná vyškolenými pracovníkmi s využitím horolezeckej techniky (obr. 18). Celkom bolo na bariérach inštalovaných 8 ks pohlcovačov energie (typ RB 1500/100) a 20 ks pohlcovačov energie (typ RB 1500/50).

Obr. 20 Pohľad na svah po kompletnej inštalácii ochranných bariér
Fig. 20 View of the slope after complete installation of protective barriers

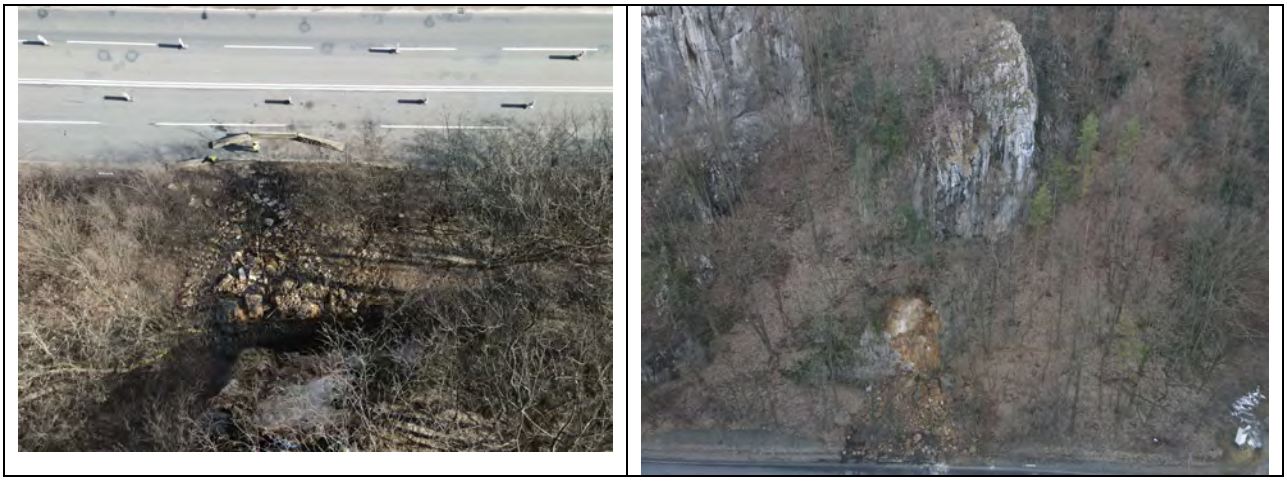
4. Lokalita Banská Bystrica – Jakub, cesta č. I/59 (2022)

V marci 2021 došlo v lokalite Banská Bystrica – Jakub k zrúteniu balvanov a blokov zo skalnej steny situovanej vo vzdialenosti cca 15 m od okraja cesty č. I/59. Objem zrúteného horninového materiálu dosahoval cca 50 m^3, odlučná časť zrútenia sa nachádzala vo výške cca 18 – 20 m nad úrovňou komunikácie. Balvany, uvoľnené zo svahu, zasiahli dva jazdné pruhy frekventovanej cesty I/59 (obr. 21-22). Obhliadku terénu a posúdenie stability skalnej

steny i okolitých svahov svahu realizovali pracovníci spoločnosti ENVIGEO (Tupý a kol., 2021). V záveroch posúdenia sa uvádza, že v skúmanom úseku cesty s dĺžkou cca 100 m sa na svahoch i skalných stenách nachádza množstvo nestabilných úlomkov, balvanov a blokov, ktoré spôsobujú vznik geodynamických javov typu opadávania a rútenia s vysokým potenciálom zasiahnuť cestu I/59. Svahy sú náchylné na uvoľnenie a zrútenie sa balvanov a blokov s rozmermi 0,4 – 0,7 m, často aj > 1 m.

4.1 Stručná charakteristika lokality

Sanované územie sa nachádza v severnej časti Banskej Bystrice, v mestskej časti Jakub. Rozprestiera sa na východne orientovaných svahoch, na úpätí ktorých je geodynamickými javmi (opadávanie a rútenie skalných blokov a balvanov) ohrozená štátna cesta I/59. Dĺžka sanovaného územia, pri päte svahu je cca 100 m. Dĺžka svahov nad cestou I/59 dosahuje 100 až 150 m, sklon svahov dosahuje 30 – 70º. Vo svahoch sa nachádzajú skalné steny a bralá s výškou > 30 m.



Obr. 21-22 Zásah komunikácie I/59 uvoľnenými balvanmi a miesto vypadnutia hornín zo svahu
Fig. 21-22 Road I / 59 hit by loose boulders and the place where the rocks fell off the slope

Skalný masív sanovaných svahov sa vyznačuje rovnakou litológiou, aká je opísaná pri zrútení v obci Jakub v roku 2017.

Obr. 23-24 Porušené a nestabilné časti skalnej steny a zrútené balvany na úpätí svahu
Fig. 23-24 Broken and unstable parts of the rock wall and collapsed boulders at the foot of the slope

4.2 Geodynamické javy

Rozvoj geodynamických javov typu rútenia je podporovaný miestami veľmi hustou sieťou puklín umožňujúcich prenikanie vody do skalného masívu, jej zamŕzanie a rozvoľňovanie masívu. Pravdepodobnosť vypadávania a rútenia úlomkov, balvanov a blokov zo svahov je vysoká. Zo svahov hrozí uvoľnenie a zrútenie sa balvanov a blokov s rozmermi 0,4 – 0,7 m, často aj > 1 m.

4.3 Návrh sanačných opatrení

Po vyhodnotení inžinierskogeologického posúdenia svahov bola v území navrhnutá inštalácia ochrannej záchytnej bariéry umiestnenej na úpätí svahu. Návrh energetickej triedy bariéry bol stanovený výpočtom energie rútenia. V území bola navrhnutá inštalácia dynamickej bariéry typ MACCAFERRI RB 2000 s dĺžkou 90 m, výškou 4 m a plochou záchytných polí 360 m^2.

Okrem bariér bola nestabilná časť skalnej steny, z ktorej došlo k zrúteniu v marci 2021, očistená od nestabilných balvanov a blokov a sanovaná (opláštená) kotvenými oceľovými sieťami s celkovou plochou 280 m^2.

4.4 Inštalácia dynamických bariér

Bariéra je umiestnená na úpätí svahu, rovnobežne s líniou cesty č. I/59. Vrty s priemerom Ø 90 a 100 mm pre lanové kotvy a základy pätiek stĺpov bariéry boli vyhotovené vrtnými súpravami Fraste Mito 40, LUMESA (obr. 25-26). Spolu bolo pri zakladaní objektu bariéry realizovaných 45 vrtov s celkovou dĺžkou 135 m.

Obr. 25-26 Realizácia vrtov pre základy pätiek a pre lanové kotvy
Fig. 25-26 Boreholes for foot foundations and for rope anchors

Pre ukotvenie každej z bariér bolo inštalovaných 11 ks vrchných lanových kotiev s dĺžkou 5 m a 4 ks bočných lanových kotiev s dĺžkou 4 – 6 m. Kotvy sú inštalované do vrtov s priemerom 100 mm, ktoré zasahujú do skalného masívu, sú fixované cementovou zmesou. Vo svahu je inštalovaných 15 ks kotiev s celkovou dĺžkou 75 m.

V čase vypracovania tohto príspevku vstupovali sanačné práce do fázy ukončenia inštalácie lanových kotiev bariéry. Z uvedeného dôvodu nie sú k dispozícii obrázky ilustrujúce inštaláciu a konečné vyhotovenie sanačných objektov. Prezentované budú autorom príspevku v dňoch konania odborného seminára.

4.5 Inštalácia ochranných oceľových sietí

Časť skalnej steny, z ktorej došlo k zrúteniu v marci 2021, bola sanovaná inštaláciou ochranných sietí. Inštalácii predchádzalo očistenie skalnej steny od nestabilných balvanov a blokov. Čistenie bolo realizované pomocou ťažkého rýpadla a ručne pneumatickým kladivami z teleskopických pracovných plošín, alebo horolezeckou technikou (obr. 27-28). Plocha očistenej steny dosahovala 320 m^2, zo steny bolo odstránených cca 5 – 7 m^3 hornín.

Obr. 27-28 Čistenie nestabilných častí skalnej steny
Fig. 27-28 Cleaning of unstable parts of the rock wall

Na očistenej skalnej stene bola inštalovaná ochranná oceľová sieť Steelgrid HR 30 System, uchytená v časti svahu nad porušenou stranou 7 kotvami dĺžky 3 m, v dolnej časti vystrojená líniou betónových závaží. Plocha inštalovaných ochranných sietí je 280 m^2.

Obr. 29-30 Inštalácia ochranných oceľových sietí na očistenú skalnú stenu
Fig. 29-30 Installation of protective steel nets on the cleaned rock wall

5. Záver

V príspevku sú prezentované príklady sanovaných lokalít, v ktorých nebolo z technických, morfologických či ekonomických dôvodov vhodné a praktické použitie tradičných sanačných opatrení, spočívajúcich v zabezpečení skalných útvarov na svahoch ochrannými sieťami proti padajúcim balvanom a blokom. V uvedených prípadoch bolo

finančne efektívnym riešením použitie dynamických bariér skonštruovaných na zachytávanie padajúcich balvanov a blokov na povrchu svahu.

Zo svahov uvoľnené skalné bloky a balvany dosahujú pri páde vysoké kinetické energie a spôsobujú na Slovenských komunikáciách i v zastavanom území každý rok značné škody. Inštalácia ochranných dynamických bariér na problematických nestabilných svahoch susediacich s frekventovanými komunikáciami a intravilánmi miest a obcí umožňuje účinnú ochranu pred uvedenými nežiadúcimi javmi.

Obr. 31-32 Nestabilné skalné útvary v lokalite Staré Hory, stav bariér nad cestou I/14
Fig. 31-32 Unstable rock formations in Staré Hory, state of barriers over the road I/14

Vo všetkých troch prezentovaných lokalitách bola sanácia svahov realizovaná až po vzniku havarijnej udalosti, hoci prejavy nestabilných svahov nad ohrozenou infraštruktúrou boli v menšom rozsahu zaznamenávané i v období pred jej vznikom. Prezentované sanácie ukazujú, že i v našich podmienkach sme schopní úspešne zrealizovať zabezpečenie problematických svahov s využitím aktuálnych moderných riešení široko využívaných najmä v krajinách, kde bolo technické riešenie vyvinuté a je intenzívne aplikované. Slovensko ale vo výraznej miere zaostáva za vyspelými krajinami (Švajčiarsko, Rakúsko, Nórsko, Taliansko, Francúzsko,...) i za niektorými krajinami strednej Európy (Slovinsko, Chorvátsko,...), v ktorých sa už desaťročia uplatňuje systematický prístup k identifikácii a evidencii problematických svahov ohrozujúcich dôležitú infraštruktúru. Je zrejmé, že inštalácia ochranných prvkov v blízkosti objektov dôležitej infraštruktúry (cesty I. triedy, hlavné železničné trate,...) je v našej krajine skôr živelná ako systematická. Na svahoch susediacich s frekventovanými cestnými a železničnými trasami i na svahoch susediacich s aglomeráciami sa nezriedka nachádzajú neidentifikované nestabilné skalné útvary s vysokým „ničivým“ potenciálom (obr. 31). Zanedbávaná a podceňovaná je i pravidelná údržba a revízia o sanačných objektov inštalovaných u nás v posledných desaťročiach (obr. 32).

Sme presvedčení, že najmä s ohľadom na zvyšujúcu sa hustotu cestnej dopravy a prebiehajúce klimatické zmeny by si uvedená problematika zaslúžila systematický prístup, ktorý by bolo vhodné zosúladiť a realizovať v horizonte budúcich desaťročí. Jednotný program identifikácie ohrozenia ciest I. triedy a hlavných železničných tratí s databázou problematických svahov, by mohol byť prvým krokom smerujúcim k systematickému zvyšovaniu ochrany a bezpečnosti ohrozených úsekov dopravnej infraštruktúry Slovenska.

Zoznam literatúry

Ilkanič, A., 2017: Inžinierskogeologické posúdenie geodynamických javov a návrh zabezpečenia svahu na Ovocnej ulici. ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica.

Ilkanič, A., 2017: Kozelník inžinierskogeologické posúdenie a návrh sanačných prác. ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica.

Jelínek, R., Mikušová, J., Liščák, P., 2016: Posúdenie skalného zrútenia v obci Kozelník. ŠGÚDŠ Bratislava

Tupý, P., Ilkanič, A., 2021: Inžinierskogeologické posúdenie geodynamických javov a návrh zabezpečenia svahu v Banskej Bystrici v Jakube na ceste I/59. ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica.

OŽIVENÍ STARÉHO SESUVU VE MĚSTĚ DĚČÍN, ULICE HRANIČNÍ – SELHÁNÍ SYSTÉMU VÝSTAVBY

REACTIVATION OF OLD LANDSLIDE IN DĚČÍN CITY, HRANIČNÍ STREET – FAILURE OF THE SYSTEM OF CONSTRUCTION

Petr Kycl[1]

[1]*Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21, Praha, Česká republika, e-mail: petr.kycl@geology.cz*

Abstrakt: Příspěvek popisuje aktivaci starého sesuvu novou výstavbou a porušení okolní infrastruktury, přičemž zarážející na celém případu je především celkové selhání systému. I když vlastník pozemku, nemající o sesuvech žádné povědomí, postupoval podle zákonů a udělal vše pro úspěšnou realizaci stavby, vyvolal při výstavbě sesuv a způsobil škody na majetku obce, svém a soukromých vlastníků v řádu milionů korun. Zažádal a dostal stavební povolení, měl zpracován inženýrskogeologický průzkum a najal si a zaplatil projektanta, který mu stavbu naprojektoval a řídil. Na stavbě byl dokonce stavební dozor. Nikdo ze zainteresovaných ale netušil, že se pohybuje v historicky dobře známém a popsaném sesuvu, registrovaném v databázích ČGS a že zásahy do svahu (nezajištěné zářezy ve stavební jámě) jsou v rozporu se základním inženýrskogeologickým myšlením.

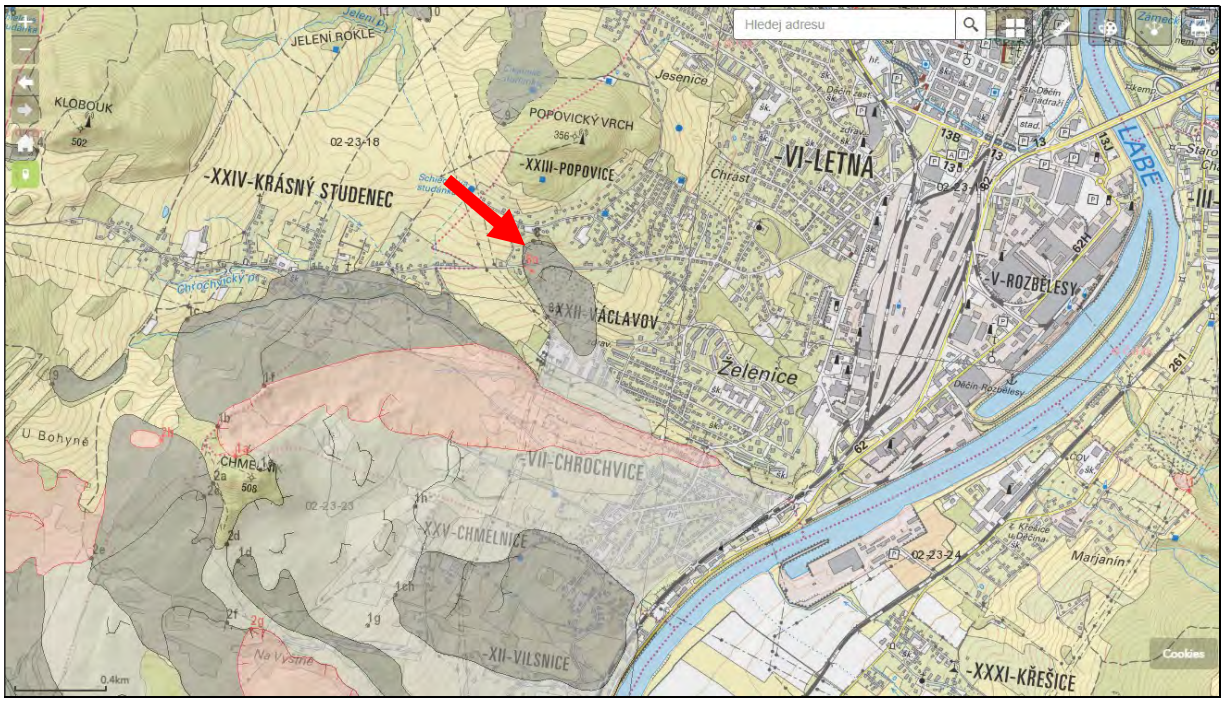
Abstract: The article describes the reactivation of the old landslide (first activation in 1898) by new construction and the damages of the surrounding infrastructure, while the overall failure of the system is astonishing in the case. Although the landowner, who had no knowledge of the landslides, proceeded according to the law and did everything for the successful implementation of the construction, he generated a landslide during the construction and caused damage to the property of the municipality, on his and private owners' property in the order of millions of crowns. He required and obtained a construction permit, had an engineering geological survey and hired and paid a designer who designed and managed the construction for him. There was even supervision on the construction site. However, none of the stakeholders knew were moving in a historically well-known and described landslide, registered in the CGS databases, and that the interventions in the old landslides (unprotected cuts) were contrary to basic engineering geological model.

Kľúčové slová: sesuv, historické podklady, inženýrskogeologický průzkum, výstavba

Key words: landslide, historical information, engineering geological investigation, construction

1. Úvod

Děčín - Václavov, ulice Hraniční. Místo opakovaných „tragédií“, způsobených jedním sesuvem. V roce 1898, když tehdy na jaře poprvé sesuv vznikl pobořil několik stavení. Záznamy z tohoto incidentu lze dodnes nalézt v kronikách nebo v dobovém tisku. Zajímavostí na celém případu je, že tento sesuv byl po dalších 120 let předmětem zájmu různých geologů, včetně autora tohoto příspěvku. Sesuv byl tedy dobře znám, zaevidován v databázích a ve veřejných registrech dostupných komukoli (https://mapy.geology.cz/svahove_nestability/), přesto na něm začala 5. dubna 2019 výstavba rodinného domu. To by nebylo samo o sobě až tak tragické, vždyť často se dá s respektem k základním inženýrskogeologickým zákonitostem stavět i na sesuvu, nicméně v tomto případě to bylo naprosto neuvážené. Hlubokým nezajištěným výkopem pro stavbu byla oživena západní část starého sesuvu a byla poškozena infrastruktura v okolí – silnice, dům nad stavební jamou. Jen včasným zásahem geologů, kteří byli náhodou přivoláni na místo nedošlo ještě k větší tragédii, a to k rozvinutí sesuvu. Po příjezdu geologů na místo výkopu bylo okamžitě rozhodnuto, že výkop se musí zasypat a pokud co možná i částečně zhutnit. Tento včasný zásah pak rozvíjející se sesuv zastavil. Na celém případu bylo zarážející, že ani stavitel (ten to ovšem poznat nemusí), ale ani průzkumník, projektant či dozor na stavbě netušili, že staví přímo v sesuvu.



Obr. 1 Lokalizace sesuvu (č. 8) jižně od Popovického vrchu. V jižní polovině snímku největší sesuvné území v ČR – Bohyně © www.geology.cz

Fig. 1 Landslide location (No. 8) south of Popovický vrch Hill. In the southern half of the picture, the largest landslide area in the Czech Republic – „Bohyně“. © www.geology.cz

2. Historie lokality

Sesuv pod Popovickým vrchem (356 m n.m.), v jihozápadní části Děčína, části XXII – Václavov v ulici Hraniční je velmi dobře známou a mnohokrát popsanou sesuvnou lokalitou. Sesuv vznikl na jaře roku 1898 (obr. 2). Prvotní dokumentaci sesuvu pak do původního československého Registru sesuvů provedl A. Absolon v roce 1962 (obr. 3). Mezitím byl sesuv sanován na základě projektu z roku 1932 pomocí odvodnění (obr. 4). Do registru

svahových nestabilit ČGS (RSN) byl poslední aktualizovaný záznam vložen v roce 2017 a nyní ho ČGS vede v evidenci pod č. 02-23-18/08. Sesuv byl zařazen a veden v nejrizikovější III. kategorii.

Oblast v okolí Chrochvického potoka (dříve potok Welz) v jihozápadní části Děčína, kam patří i popisovaný sesuv, patří mezi oblasti s častým výskytem velkých svahových deformací. Zatímco na pravém břehu je znám tzv. Chrochvický sesuv, jenž vznikl v roce 1914 a pobořil část obce Krásný Studenec, na levobřežních svazích je znám právě sesuv pod Popovickým vrchem v ulici Hraniční (obr. 1). Oba dva sesuvy jsou pak dobře popsány v dobovém tisku a na oba sesuvy se sjížděli podívat lidé z širokého okolí (údajně až z Prahy).

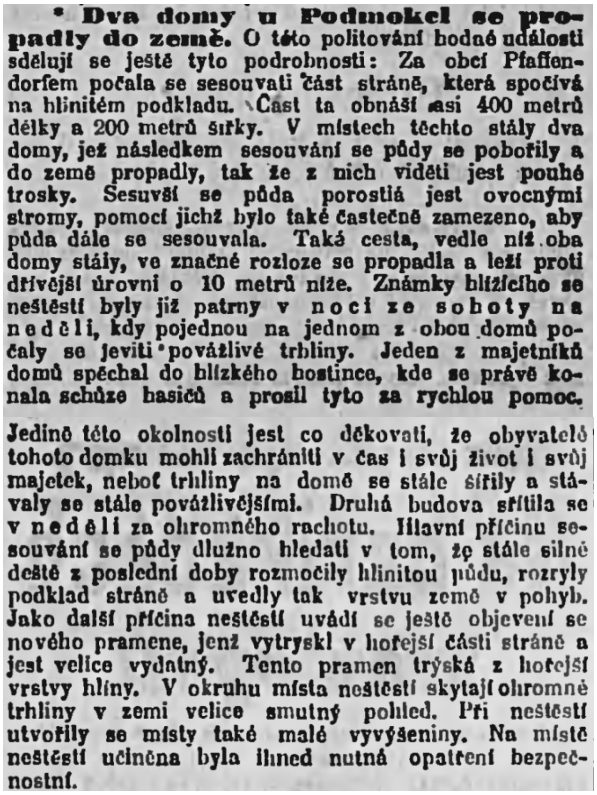
2.1 Rok 1898 – vznik sesuvu a jeho historické záznamy

Erdrutſchung 1898 in Pfaffendorf (Haus des Karl Marſchner)

Obr. 2 Sesuv a způsobené škody na fotografii z roku 1898 (kronika Podmokel).
Fig. 2 Damages caused by landslide in a photo from 1898 (Podmokly chronicle).

Jak již bylo zmíněno, sesuv v dnešním Děčíně, čtvrti Václavov byl dobře popsán hned 3. den po jeho vniku v dobovém tisku, tj. v Národní politice. „Dva domy u Podmokel se propadly do země“, hlásaly tehdejší titulky. Národní politika byl tak trochu bulvární plátek, který informoval o každé krádeži, vraždě či jiném neštěstí. Sesuvy, resp. škody, jež sesuvy páchaly se tak v jednotlivých číslech Národní politiky objevovaly poměrně pravidelně. Nutno dodat, že tehdejší novináři byli velmi pečliví a ohledně sesuvů se lze dočíst prakticky vše podstatné. Od jejich velikosti, rychlosti pohybu, způsobených škodách, časové posloupnosti, sanačních opatřeních, hydrogeologických poměrech či následných zabezpečovacích pracích (více na obr. 3).

Několik fotografií z doby vzniku sesuvu lze nalézt také v kronice Podmokel (obr. 2).



*** Dva domy u Podmokel se propadly do země.** O této politování hodné události sdělují se ještě tyto podrobnosti: Za obcí Pfaffendorfem počala se sesouvati část stráně, která spočívá na hlinitém podkladu. Část ta obnáší asi 400 metrů délky a 200 metrů šířky. V místech těchto stály dva domy, jež následkem sesouvání se půdy se pobořily a do země propadly, tak že z nich viděti jest pouhé trosky. Sesuvší se půda porostlá jest ovocnými stromy, pomocí jichž bylo také částečně zamezeno, aby půda dále se sesouvala. Také cesta, vedle níž oba domy stály, ve značné rozloze se propadla a leží proti dřívější úrovni o 10 metrů níže. Známky blížícího se neštěstí byly již patrny v noci ze soboty na neděli, kdy pojednou na jednom z obou domů počaly se jeviti povážlivé trhliny. Jeden z majetníků domů spěchal do blízkého hostince, kde se právě konala schůze hasičů a prosil tyto za rychlou pomoc.

Jedině této okolnosti jest co děkovati, že obyvatelé tohoto domku mohli zachrániti v čas i svůj život i svůj majetek, neboť trhliny na domě se stále šířily a stávaly se stále povážlivějšími. Druhá budova sřítila se v neděli za ohromného rachotu. Hlavní příčinu sesouvání se půdy dlužno hledati v tom, že stále silné deště z poslední doby rozmočily hlinitou půdu, rozryly podklad stráně a uvedly tak vrstvu země v pohyb. Jako další příčina neštěstí uvádí se ještě objevení se nového pramene, jenž vytryskl v hořejší části stráně a jest velice vydatný. Tento pramen trýská z hořejší vrstvy hlíny. V okruhu místa neštěstí skytají ohromné trhliny v zemi velice smutný pohled. Při neštěstí utvořily se místy také malé vyvýšeniny. Na místě neštěstí učiněna byla ihned nutná opatření bezpečnostní.

*** Dva domy propadly se do země.** O sensační této události v Pfaffendorfu u Podmokl sběhlé, oznamují se ještě četné poutavé podrobnosti. O 9. hodině počala v obydlí železničního zřízence Marschnera padati se stěn omítka, což spojeno bylo s podivným třeskem a harašením. Jak jsme již v ranním čísle uvedli, spěchal Marschner do blízkého hostince, vyžádati si pomoc hasičskou. O 1. hodině s půlnoci pokročilo zhoubné dílo podzemské do takových rozměrů, že nebylo více možno do ohroženého domu vstoupiti. Sesouvání dělo se před užaslými zraky svědků zvolna, ale ustavičně. Na okresní silnici objevily se rovněž široké trhliny, následkem čehož pak musila býti doprava v jisté části její úplně zamezena. Vždy mocnější rozléhal se hlomoz a třesk v domě ohroženém — a nenadále oddělily se základy i se schodištěm od vrchní části domu a s hromovým rachotem propadly se do hlubiny. Zvláštní dojem působilo, že nikdo neviděl, kterým směrem se půda sesouvá; jevilyť se jen ohromné prohlubiny, hluboké otvory a šířící se prorvy povrchu. Teprv ráno naskytl se zrakům diváků celý obraz díla spousty. Silnice zmizela úplně s povrchu v délce 150 metrů a zde patrny byly trhliny zšíří 6 až 8 metrů. V 7 hodin propadl se i celý zbytek domu Marschnerova — o hodinu později zbyla ze stavení jen pustá zřícenina. Dům tento sklesl na 7 metrů hluboko pod zemi a pošinut byl o 10 metrů se svého původního místa. Ve vážném nebezpečí nalézal se též dům sousední, mající číslo 38-84, jenž také utrpěl značných trhlin, nicméně na povrchu země se udržel. Také četné stromy byly katastrofou z kořene vyvráceny a zmizely v propasti. Tisícové navštívili místo spousty a s hrůzou pozorovali změny za jedinou noc zde nastalé. Sestoupil se již také zvláštní pomocný výbor, aby poškozeným aspoň částečně škoda byla nahražena. V noci ze soboty na neděli propadly se ještě i zbylé trámy ze zřícenin domu Marschnerova. V pondělí zasáhlo záhubné působení tajemných živlů i na pozemky sedlnické, kdež roztrhl se po celé své rozsáhlosti široký trávník. V jisté hloubce pod korou zemskou shromáždily se vody takovou měrou, že tvoří celý rozsáhlý rybník. V úterý ráno situace byla takřka nezměněna. Několik vrstev zemských se opět oddělilo, ale půda jen o něco málo se dále posunula.

Obr. 3 O vzniku sesuvu informuje Národní politika č. 96 z roku 1898 (dopolední a odpolední).
Fig. 3 Národní politika No. 96 in 1898 (morning and afternoon) informs about the landslide.

2.2 Rok 1932 – návrh na sanaci sesuvu

Z roku 1932 se dochovala projektová dokumentace na zklidnění širší oblasti místní části „Seldnitz“ (dnešní Želenice) včetně okresní silnice Podmokly – Schönborn (dnešní ulice Hraniční ve směru na Krásný Studenec), tedy včetně popisovaného sesuvu (Böhmer und Schmelowsky 1932).

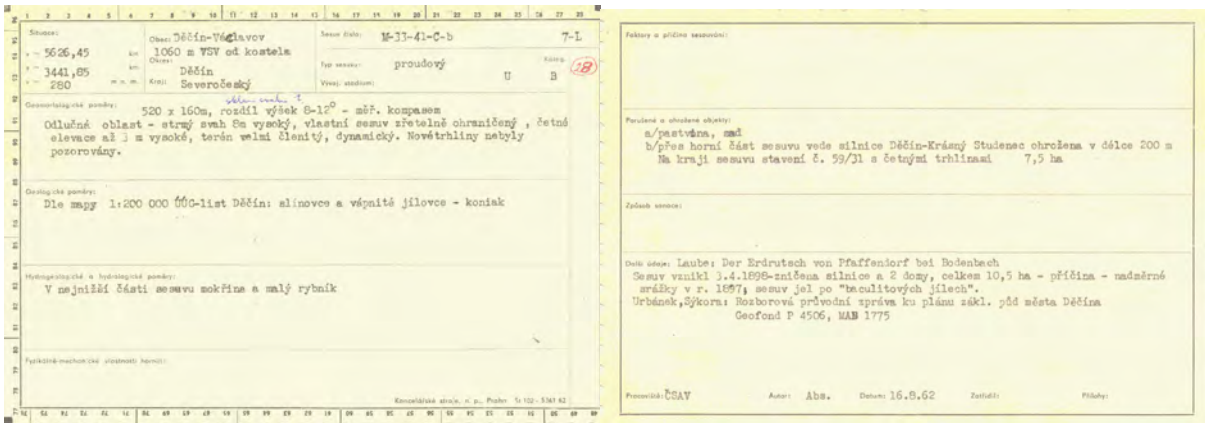
Projekt spočívající v celkovém odvodnění oblasti nabýval na důležitosti ze dvou důvodů. Jednak se měla rozšiřovat zástavba do tohoto území a dále přetrvávalo nebezpečí, že by okresní silnice Podmokly – Schönborn, jež byla nedávno opět rekonstruována, mohla býti znovu porušena sesouváním. Tyto záznamy v návrhu sanace jen dokládají opakovanou aktivitu sesuvu a neustále obnovování pohybů v okolí této důležité silnice (jediné spojení Krásného Studence s Děčínem). Stabilizace sesuvného území je v projektu řešena v několika úrovních. Odvodňovacím zářezem v horní části pod kopcem Pffafenberg (Popovický vrch), který navazoval na již provedené odvodňovací práce v roce 1926 a dále systémem 2-3 m hlubokých odvodňovacích zářezů, kdy do dna bylo položeno drenážní potrubí zakryté kamennou rovnaninou (obr. 4). Zářezy byly naprojektovány tak, aby sběrné potrubí položené v kamenné rovnanině prořízlo vodonosné vrstvy a přes sběrné šachty (obr. 4, písmena B, C, D) se odváděla voda do stokové šachtice (obr. 4, písmeno A). Zdali se odvodnění realizovalo přesně podle projektu a jaká je jeho současná funkčnost není známo.

Podle rukou dopsaného údaje v projektové dokumentaci stála celá sanace 175 tis. Kč.

Obr. 4 Kopie projektu sanace (návrh odvodnění) z roku 1932 od firmy Böhmer und Schmelowsky.
Fig. 4 A copy of the mitigation project (drainage design) from 1932 by Böhmer und Schmelowsky.

2.3 Rok 1962 – První dokumentace sesuvu do československého „Registru sesuvů“

Události v Handlové v roce 1961 vedly k vytvoření světově unikátní databáze sesuvů, kterou se tehdejší Československo mohlo právem pyšnit. Rovněž tento sesuv pod Popovickým vrchem neunikl našim geologům. Hned v prvních fázích mapování v první velké kampani, přesněji 16. srpna 1962, byl sesuv do Registru zanesen Absolonem (obr. 5), čemuž odpovídá také velmi nízké číslo záznamu – 28 (tj. 28. zmapovaný sesuv v pořadí do nového Registru sesuvů). Z popisu na záznamové kartě vyplývá, že byl sesuv i po 70 letech od vzniku stále dobře morfologicky zřetelný, ale nové trhliny či oživení nebylo pozorováno.



Obr. 5 Záznamová karta sesuvu z roku 1962 (Absolon A.).
Fig. 5 Landslide inventory card from 1962 (Absolon A.).

2.4 Rok 2004 a 2015 – revize sesuvu a záznam do RSN

První podrobná dokumentace sesuvu do národní databáze sesuvů – Registru svahových nestabilit ČGS – proběhla v roce 2004 (Kycl et al 2006) a poté byl záznam v roce 2017 aktualizován (Kycl in Krejčí et al 2017). Sesuv na jižních svazích Popovického vrchu (356 m) dosahuje délky 520 m a kolísavé šířky kolem 180 m. Sesuv je stále dobře morfologicky patrný, i když jeho vznik je datován již dne 3. dubna 1898, resp. první projevy v podobě praskání omítky byly pozorovány o den dříve (národní politika 96/1898, Absolon 1962, Špůrek 1967) a je tedy více než 120 let starý. Otázkou zůstává, zda je možné hranice sesuvu vést níže až do údolí Chrochvického potoka (ve starší fázi sesouvání), potom by byl sesuv delší o cca 200 m, anebo ho ukončit výše ve svahu v hranicích sesouvání z roku 1898. Sesuv v roce 1898 pobořil dva domy a na jeho okraji zůstalo poškozeno stavení č. 59/31 s četnými trhlinami. Silnice Děčín Václavov – Krásný Studenec (dnes ulice Hraniční) byla zničena a posunuta po svahu o několik metrů. Sesuv byl zřejmě aktivní také v dubnu 1900, když o sesouvání silnice mezi Děčínem a Krásným Studencem pod "Seidlovou skálou" popisuje Národní politika (1900/62). Další pohyby jsou datovány mezi 5. – 12. červnem 1926 (Špůrek 1967), kdy byla opět porušena silnice do Václavova a kdy se také provedly první odvodňovací práce.

V horní části sesuvu dominují dvě výrazné, i když zahrádkáři již upravené odlučné stěny, ta hlavní o výšce 8 m. Silnice je v tomto místě evidentně prohnutá, kopírující po vrstevnici sesuvnou vyklizenou kotlinu. Spodní akumulační část je již výrazně přemodelována zahrádkářskou činností. Sesuv je dnes z části zastavěn a pozměněn zahrádkářskou kolonií, což jen doplňuje trend 70. – 90. let, kdy se zahrádkářské kolonie ve svažitém území situovaly většinou do starých, někdy i částečně aplanovaných sesuvů z důvodu jejich špatné využitelnosti pro plánovanou výstavbu. Nezřídka se tyto sesuvy reaktivovaly a zahrádkářské kolonie poškodily (v okolí např. Skorotice, Děčín – Křešice, Poláky aj.).

Autobusová zastávka, jakož i přilehlá ulice jsou pojmenovány „Na skluzu“, což jen dokládá bohatou historii sesouvání v této oblasti.

2.5 Rok 2008, 2009 – Inženýrskogeologický průzkum, územní plán a stavební povolení

V roce 2008 objednal investor na pozemku inženýrskogeologický průzkum (Florík (10/2008). Rozsah průzkumu byl dle zpracovatele zadán projektantem a spočíval ve vyhloubení dvou sond o hloubce 4 m celkem tedy bylo realizováno 8 bm vrtů ruční vrtnou soupravou. Po ukončení průzkumu byly vrty zlikvidovány. Oběma vrty byly zjištěny cca 1,5 m mocné navážky s větším množstvím cihel a dřeva (pozůstatky zbořených domů??). Ačkoli byl průzkum podprůměrný a velmi strohý, jeho závěry byly srozumitelné. Při hloubení dočasných otevřených výkopů hlubších jak 2 m bylo doporučeno zapažit stěny s řádným rozepřením (srovnej s obr. 6). Dále je v textu uvedeno upozornění: *„Oblast Václavova je v geologických mapách sesuvných pásem registrována jako oblast náchylná k sesuvům. Z těchto důvodů doporučujeme následující. Zářezy do svahu provádět po etapách, s okamžitým zajištěním paty svahu (např. z gabionů). Výkopy pro inženýrské sítě provádět pokud možno kolmo na vrstevnice. Pokud to nebude možné, pak je nutné tyto práce provádět také po etapách s okamžitým položením příslušného zařízení a zpětným zhutňovaným zásypem.“* Ačkoli žádné mapy sesuvných pásem neexistují a průzkumník vůbec netušil, že provádí inženýrskogeologický průzkum přímo na sesuvu, upozornění na „sesuvné území“ v průzkumu bylo.

Jak již bylo uvedeno, průzkum nedosahoval standartních kvalit, postrádal IG řez, popisy sond byly velmi strohé, sondy byly relativně mělké (nedosáhly ani slínovců v podloží, jedna

sonda nešla pod základovou spáru), nebyla zřejmě měřena ustálená hl. p. vody, protože sondy byly dokumentovány jako suché (srovnej s obr. 7). Bohužel celý průzkum pak končí tragickým dovětkem, že se jedná o jednoduché základové poměry (stavba v dočasně uklidněném sesuvu) a má se postupovat podle zásad 1. geotechnické kategorie. Tento závěr možná přesvědčil projektanta, že jde o běžnou rutinní záležitost.

Dle platného územního plánu města Děčín je oblast výstavby tohoto domu vedena v zóně „ZPF“ – zemědělský půdní fond, v zelené barvě – „zahrádkářské osady“ a dále v místě probíhá hranice, i když velmi nepřesná, která v legendě upozorňuje na „území ohrožené sesuvy“.

Stavební povolení pak bylo vydáno 3. července 2009 s tím, že projektová dokumentace stavby splňuje obecné technické požadavky na stavby a podmínky územního rozhodnutí o umístění stavby. Stavební úřad během řízení neshledal důvody, které by bránily povolení stavby.

4. Místní šetření

Na lokalitě, pozemky p.č. 3127 a 3128, k.ú. Podmokly, probíhaly 5. dubna 2019 za pomocí bagru výkopové práce pro stavbu rodinného domu. Výkop byl hluboký od 1 do 5 m, nezapažený a probíhal přímo pod silnicí vedoucí směrem na Krásný Studenec, po které v tu dobu jezdily nejen osobní auta, ale také autobusy MHD a těžké zemědělské stroje. Při výkopových pracích se objevila trhlina v asfaltové silnici a začal praskat dům č.p. 48 nad silnici (obr. 6 až 10). Shodou náhod se na místo dostavili ještě v průběhu výkopových prací geologové, kteří zápisem do stavebního deníku ihned doporučili zastavit práce, zasypat výkop a dále situaci monitorovat až do zklidnění pohybů. Investor všechna doporučení naštěstí odsouhlasil a řádně spolupracoval.

Ve stavební jámě bylo možné pozorovat rozvíjející se smykové plochy a pestré svahové sedimenty promísené s navážkami, nasunuté na slínovce březenského souvrství. V jižní části výkopu vytékal pramen (obr. 7), což nikoho z přítomných nijak neznepokojovalo (IGP vodu nezastihl). Vzhledem k časovému presu, ale nebyl čas na detailnější dokumentaci.

Obr. 6 Celkový pohled na stavební jámu situovanou v sesuvu. Silnice probíhá přímo nad hranou odřezu. Výška odřezu dosahuje až 5 m. Šipkou vektor pohybu sesuvu z roku 1898.
Fig. 6 General view of a open pit situated in a landslide body. The road is situated directly above the edge of the cut. Height of the cut is up to 5 m. Arrow-shown landslide movement vector from 1898.

Obr. 7 Pramen v jižní části stavební jámy s vydatností do 0,1 l.s^{-1}.
Fig. 7 Spring in the southern part of the cut with a yield up to 0.1 l.s^{-1}.

Obr. 8 Rozevřená trhlina v silnici Děčín – Krásný Studenec o šíři až 2 cm.
Fig. 8 An open crack in the Děčín - Krásný Studenec road up to 2 cm wide.

Obr. 9 Čerstvé praskliny v domě č.p. 48 byly nevratného charakteru (nosné zdi, obklady, podlaha aj.)
Fig. 9 Recent cracks in the house No. 48 were irreversible (bearing wall, tiles, floor etc.)

Obr. 10 Zastávka autobusu „Na skluzu“ přímo nad stavební jamou.
Fig. 10 Bus stop „On the slip“ over construction pit.

5. Závěr

Sesuv v dané lokalitě byl dobře zdokumentován a znám, a to již od roku 1898. V průběhu 20. století se opakovaně sesuv mapoval a průběžně zaznamenával do národních databází sesuvů. Na sesuvu proběhla sanace v podobě odvodnění. ČGS o sesuvu pravidelně

informovala ve svých zprávách a na základě mapovacích projektů byly průběžně aktualizována data v národním Registru svahových deformací. V územním plánu města Děčín byl sesuv, ačkoli nepřesně, zaznamenán jako „území ohrožené sesuvy“. Zastávka autobusu v místě stavby nese příznačné jméno „Na skluzu“. I přes velmi slabou úroveň inženýrskogeologického průzkumu bylo v jeho závěru doporučeno, aby se výkopy ihned pažily a že se jedná o sesuvné území. Přesto došlo při výstavbě rodinného domu k fatálním pochybením a ke znovuoživení sesuvu. Hluboký otevřený výkop (až 5 m) pro stavební jámu nebyl nijak zabezpečen, navíc výkopek ze stavební jámy byl nepochopitelně navážen nad samotný výkop do boční odlučné oblasti sesuvu. Takové výjevy šlo pozorovat před 20 lety v rozvojových zemích, kde se to dalo s jistou mírou nadsázky pochopit.

Geologové, jež se dostali v den výkopových prací na místo doporučili okamžité kroky, které měly vést k dočasnému zastavení pohybů. Šlo především o vyrovnání bilance zemin – tj. okamžitému zpětnému zasypání stavební jámy výkopkem, který byl deponován v odlučné oblasti sesuvu nad hranou stavební jámy. Dále byl doporučen základní monitoring silnice a domu č.p.48. Do uklidnění pohybů ČGS doporučila omezit dopravu na silnici pro těžkou dopravu (především autobusy) a vystěhovat obyvatele domu č.p. 48. Jak se později ukázalo, včasné rozhodnutí „okamžitě zasypat výkop“ bylo správné a pohyby nad výkopem ustaly a k plnému rozvinutí sesuvu již nedošlo.

Celá kauza tímto ovšem neskončila. Stavba byla zastavena a investor přišel o nemalé prostředky ve výši ca 3 mil CZK na koupi pozemku a zahájení stavby. Následovala soudní dohra (popř. mimosoudní vyrovnání) o další repatriace v podobě zabezpečení domu č.p. 48 spřažením ocelovými táhly a položení nového asfaltu a úpravy a zúžení silnice. Průběh tohoto řízení ale již není předmětem předloženého příspěvku. Současný stav místa je pak doložen na obr. 11.

Na závěr se nabízí otázka. Co ještě geologové mohu udělat více proto, aby se takové události neopakovaly? Jak může být ochráněn investor, který splní vše potřebné a stejně je v konečném důsledku nejvíce poškozený?

Obr. 11 Současný stav v místě sesuvu (květen 2022)
Fig. 11 Current state at the landslide site (May 2022)

Seznam literatury

Absolon, A., 1962: Záznamová karta sesuv č. 28 – Registr sesuvů.

Böhmer und Schmelowsky, 1932: Projekt über die Stabilisierung eines Rutschgebietes im Ortsteile Seldnitz. Bodenbach

Florík, Z., 10/2008: Průzkumné práce Děčín, Stavba RD – k.ú. Václavov p.č. 3128.Florík – IGF Ústí nad Labem.

Hynie, O., 1928: Geologický posudek o všeobecných příčinách vodních katastrof v Českém Středohoří se zvláštním zřetelem na některé menší přítoky Labe mezi Podmokly a Litoměřicemi. – Státní geologický ústav Československé republiky. Praha.

Kycl, P. a kol., 2006: Nebezpečí svahových pohybů v Českém středohoří na území okresů Most, Teplice a Česká Lípa. Studie MŽP, OG. – ČGS. Praha.

Krejčí, O., Krejčí, V., Kycl, P., Paleček, M., Rybář, J., 2017: Bohyně na Děčínsku – nejrozsáhlejší sesuvné území v České republice. – Zprávy o geologických výzkumech za rok 2016. ČGS. Praha.

Špůrek, M., 1963: Historická analýza působení klimatického sesuvného faktoru v Českém masivu. – ČSAV. Praha. (sign. GF P025042)

Zahálka, Č., 1890: O ssutinách čedičových a znělcových v Českém Středohoří. – Vesmír 19, str. 66 a 74. Praha.

Národní politika ročník 1898, č. 96

ÚZEMNÉ PLÁNY MIEST A OBCÍ A INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM

REGIONAL PLANS OF TOWNS AND MUNICIPALITIES AND ENGINEERING GEOLOGICAL SURVEY

Boris Vrábel[1], Peter Fekeč[2]

[1]*Geotechnik Sk, s.r.o., Západná 11, 010 04 Žilina, Slovenská republika, e-mail: fekec@geotechnik.sk, vrabel@geotechnik.sk*

Abstrakt: Pri tvorbe územných plánov miest a obcí je potrebné vykonať inžinierskogeologické mapovanie, ako časť inžinierskogeologického prieskumu. Prax je taká, že 90 % týchto prieskumov sa robí bez terénneho prieskumu a rekognoskácie, len z mapových podkladov. V príspevku je poukázané na opodstatnenosť vykonávať inžinierskogeologický prieskum podrobnou rekognoskáciou územia a objektov občianskej výstavby vo vyznačenom území katastra obce.

Abstract: When creating regional plans of towns and municipalities, it is necessary to carry out engineering geological mapping as part of the engineering geological survey. The practice is that 90% of these surveys are done without field research and reconnaissance, but only from map data. The paper points out the justification for conducting an engineering geological survey with a detailed reconnaissance of the territory and civil engineering objects in the designated area of the cadastre of the municipality.

Kľúčové slová: inžinierskogeologický, prieskum, územný, plán, mesto, obec

Key words: engineering geological, survey, regional, plan, town, municipality

1. Úvod

Vzhľadom na praktické skúsenosti, získané pri riešení rôznych rizikových a havarijných udalostí, spojených predovšetkým so stavebnou činnosťou v zosuvnom území a území postihnutom ostatnými geodynamickými javmi, v územiach miest a obcí, nastáva potreba tieto skutočnosti komplexne riešiť. Vydaním stavebného povolenia v územiach, ktoré sú potenciálne zosuvné a nedôjde k nariadeniu zo strany stavebného úradu, aby bol vykonaný inžinierskogeologický prieskum, dochádza k stavebným činnostiam, ktoré zosuvné procesy urýchľujú. V tomto dôsledku potom dochádza k vzniku škôd na majetku, prípadne ohrozenie života občanov. Následne môže táto skutočnosť viesť k vzniku škôd na majetku, poistnej udalosti alebo aj trestnoprávnym úkonom, kedy sa hľadá vinník, ktorý spôsobil škodu. Hľadanie chyby na strane stavebníka, alebo stavebného úradu, ktorý vydáva stavebné povolenie je často proces zdĺhavý a napätý.

Vypracovaním súboru poznatkov z inžinierskej geológie, stavebníctva – špeciálneho zakladania, sanácie zosuvov, získaných profesionálnou skúsenosťou, štúdiom archívnych dokumentov z prác vykonaných v skúmaných oblastiach je možné týmto skutočnostiam predísť a úplne ich eliminovať. Výsledkom tohto procesu je súbor nariadení a odporúčaní pre stavebnú činnosť v zónach určených pre individuálnu, resp. kolektívnu bytovú výstavbu, alebo pre priemyselnú výstavbu tam, kde to je určené územným plánom.

2. Štruktúra dokumentu – modelový dokument

Názov.

Horná Dolná - nariadenia a odporúčania pre stavebnú činnosť, rozdelené podľa zón pre potreby územného plánu obce Horná Dolná

Geologická časť - všeobecná

- Geologická preskúmanosť územia
- Geomorfologické pomery
- Geologické a tektonické pomery
- Hydrogeologické a hydrologické pomery
- Klimatické pomery
- Seizmicita
- Geologická charakteristika územia z hľadiska geodynamických javov

Podrobná časť

Rozdelenie územia v zmysle územného plánu na zóny

Pred vykonaním zonácie je potrebné vykonať pasportizáciu jestvujúcich budov v zastavanej časti mesta, alebo obce s cieľom identifikovať ťahové trhliny, terénne úpravy antropogénne navážky, výkopy, informácie o stave výšky hladiny podzemnej vody v studniach, vykonaných stabilitných opatreniach v minulosti atď.

Zóna A:

Táto zóna predstavuje územie, v ktorom **neodporúčame stavať (obr. 1)**, resp. územie, kde je výstavba IBV, resp. priemyselnej výstavby možná len po splnení nasledovných podmienok:

- Vykonať podrobný inžinierskogeologický prieskum vrátane posúdenia stability územia pomocou stabilitného výpočtu v zmysle platnej legislatívy:
- Zákon č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov je základnou právnou úpravou upravujúcou podmienky projektovania,

vykonávania, vyhodnocovania a kontroly geologických prác a pôsobnosť štátnej geologickej správy. Vo vzťahu k zosuvom zákon ustanovuje povinnosť ministerstva zabezpečiť geologické práce na odvrátenie, zmiernenie alebo odstránenie následkov živelnej pohromy.

- Vyhláška MŽP SR č. 51/2008 Z. z., ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení neskorších predpisov.
- Stavby musia byť založené na tuhom železobetónovom (ŽB) rošte, resp. na železobetónovej doske, primerane vystuženej(nom) oceľovou výstužou, overená autorizovaným inžinierom SKSI, kategórie I*3, v zmysle: *Zákon č. 138/1992 Zb. Zákon Slovenskej národnej rady o autorizovaných architektoch a autorizovaných stavebných inžinieroch.*
- Pod ŽB roštom, resp. ŽB doskou **musia byť** pilóty vzdorujúce silám od zosuvného územia minimálnej hĺbky 12,0 m p. t., bez ohľadu na ich únosnosť.
- Územie pod stavbou a v jej blízkom okolí musí byť hĺbkovo odvodnené.
- V priebehu výstavby **musia byť osadené trvalo prístupné monitorovacie zariadenia** kombinovaného typu inklinometer - piezometer na meranie pohybu svahovej deformácie v telese zosuvného územia – slúžia ako systém varovných signálov pri extrémnej prírodnej aktivite: extrémne zrážky, topenie snehu, zemetrasenie, necitlivý antropogénny zásah.
- V celom území je **zákaz** vykonávať vsakovanie zrážkových vôd zo striech domov a spevnených plôch do horninového prostredia.

Obr. 1 Odtrhová hrana zosuvu ohrozuje obecnú komunikáciu a existujúce stavby
Fig. 1 Top edge of landslide threaten municipality road and existing buildings

Zóna B:

Táto zóna predstavuje územie (obr. 2), v ktorom je výstavba IBV, resp. priemyselnej výstavby možná len po splnení nasledovných požiadaviek :

- Vykonať podrobný inžinierskogeologický prieskum vrátane posúdenia stability územia pomocou stabilitného výpočtu v zmysle platnej legislatívy:

  - Zákon č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov je základnou právnou úpravou upravujúcou podmienky projektovania, vykonávania, vyhodnocovania a kontroly geologických prác a pôsobnosť štátnej geologickej správy. Vo vzťahu k zosuvom zákon ustanovuje povinnosť ministerstva zabezpečiť geologické práce na odvrátenie, zmiernenie alebo odstránenie následkov živelnej pohromy.
  - Vyhláška MŽP SR č. 51/2008 Z. z., ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení neskorších predpisov.
- **Stavby musia byť** založené na tuhom železobetónovom rošte , resp. na železobetónovej doske, resp. na kombinácii týchto dvoch základových konštrukcií.

- Odporúča sa
  - vyhotoviť hĺbkové zakladanie stavby,

  alebo
  - vyhotoviť plošné založenie stavby-objektu a použiť drenážno-stabilizačné rebrá pod stavbou.

- V celom území je **zákaz** vykonávať vsakovanie zrážkových vôd zo striech domov a spevnených plôch do horninového prostredia.
- Na vydanie stavebného povolenia v území označenom v územnom pláne (napr. 1/o, 2/o, 3/o, 4/o, 5/o ... atď.) je nutné stabilitne posúdiť celé územie, prípadne navrhnúť riešenia na zachovanie jeho celkovej stability pre daný jednotlivý stavebný zámer.

Obr. 2 Ťahové trhliny na budove rodinného domu vzniknuté v dôsledku zosuvu
Fig.2 Tensile cracks in the building of a family house caused by a landslide

Zóna C:

Táto zóna predstavuje územie, v ktorom je výstavba IBV a KBV, resp. priemyselnej výstavby možná za obvyklých podmienok**, odporúča sa však:**

- Vykonať minimálne orientačný inžinierskogeologický prieskum, resp. inžinierskogeologický posudok, zameraný na stabilitu územia a presadavosť zemín v zmysle platnej legislatívy:

o Zákon č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov je základnou právnou úpravou upravujúcou podmienky projektovania, vykonávania, vyhodnocovania a kontroly geologických prác a pôsobnosť štátnej geologickej správy. Vo vzťahu k zosuvom zákon ustanovuje povinnosť ministerstva zabezpečiť geologické práce na odvrátenie, zmiernenie alebo odstránenie následkov živelnej pohromy.

o Vyhláška MŽP SR č. 51/2008 Z. z., ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení neskorších predpisov.

- Zakladať objekty na tuhom železobetónovom rošte, resp. na železobetónovej doske, resp. na kombinácii týchto dvoch základových konštrukcií.

- V celom území je **zákaz vykonávať vsakovanie** zrážkových vôd zo striech domov a spevnených plôch do horninového prostredia, drenáže z okolia stavieb odviesť kontrolovane do recipientov .

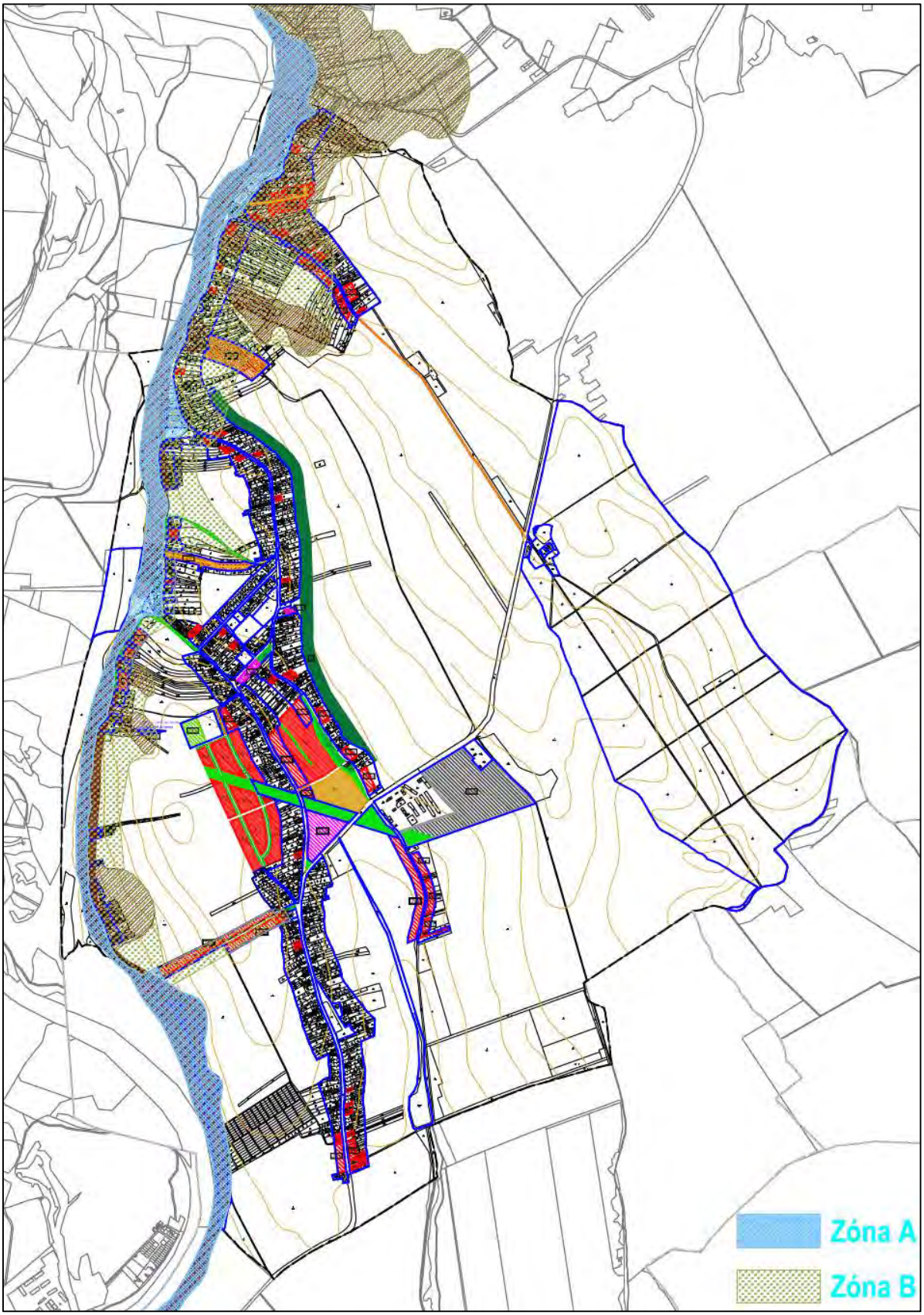
<u>Upozornenie:</u>

Existujúce stavby rodinných domov majú ťahové praskliny, resp. praskliny vzniknuté v dôsledku nepravidelného sadania budov (**dôsledok presadavosti zemín,** ktoré sa nachádzajú v danej oblasti. Ide o tzv. spraše, eolické zeminy s obsahom konkrécií $CaCO_3$, ktoré v styku s vodou pevnostne kolabujú a dochádza k nadmernému presadnutiu zeminy pod stavbou.

V celom území obce Horná Dolná, odporúčame pri akejkoľvek stavebnej činnosti postupovať v zmysle dokumentu Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, február 2018, PROGRAM PREVENCIE A MANAŽMENTU ZOSUVNÝCH RIZÍK (2014 – 2020).

3. Záver

Pri tvorbe územných plánov miest a obcí je potrebné vykonať inžinierskogeologické mapovanie, ako časť inžinierskogeologického prieskumu. Prax je taká, že 90 % inžinierskogeologických prieskumov sa robí bez terénneho prieskumu a rekognoskácie, len z mapových podkladov. V príspevku je poukázané na opodstatnenosť vykonávať inžinierskogeologický prieskum podrobnou rekognoskáciou územia a objektov občianskej výstavby vo vyznačenom území katastra obce. Územný plán obce má byť rozdelený do zón podľa geologických pomerov a stavebných obmedzení (obr. 3). V článku je predstavený modelový dokument, ktorý obsahuje nariadenia a odporúčania pre stavebnú činnosť, rozdelené podľa zón pre potreby územného plánu obce Horná Dolná.



Obr. 3 Územný plán obce, rozdelenie do zón podľa geologických pomerov a stavebných obmedzení
Fig. 3 Regional plan of municipality, division to zones depending on geological conditions and construction limits

ZÁCHRANNÉ PRÁCE V ROZSAHU VÝKONU BEZODKLADNÝCH HAVARIJNÝCH OPATRENÍ SVAHOVEJ DEFORMÁCIE NA LOKALITE SVÄTÝ ANTON

RESCUE WORKS TO THE EXTENT OF EMERGENCY MEASURES OF DEFORMATION AT SVÄTÝ ANTON LOCATION

Jozef Sňahničan[1], Branislav Prelovský[1], Matej Mažgut[2], Róbert Csizmadia[2], Miloš Pleško[2], Martin Bednarik[3]

[1]GEOSOUL,s.r.o., Rusovská cesta 13, 851 01 Bratislava, e-mail: (info@geosoul.sk)
[2]GEOFOS, s.r.o., P. O. Hviezdoslava 3778/68, 010 01 Žilina, e-mail: geofos@geofos.sk
[3] Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky PRIF UK, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava

Abstrakt: Príspevok sa zaoberá geotechnickým riešením stabilizácie havarijného zosuvu v obci Svätý Anton v rámci výkonu bezodkladných havarijných opatrení. Havarijný zosuv predstavoval bezprostredné riziko pre komunikáciu 1. triedy I/51, premávku na nej, ako aj pre priľahlé objekty. Stabilizácia zosuvného územia bola riešená komplexne, to znamená od doplnkových prieskumných prác, ktoré upresnili inžinierskogeologické a hydrogeologické pomery územia, cez návrh záchranných opatrení až k ich realizácii. Celé riešenie bolo koncepčne rozdelené do dvoch etáp. V I. etape sa navrhlo a zrealizovalo odvodnenie zosuvného územia (povrchové a hĺbkové), II. etapa riešila stabilizáciu akumulácie zosuvu pri cestnej komunikácii (oporný múr). K riešeniu návrhu II. etapy sa pristúpilo až po analýze stabilitnej situácie masívu po odvodnení a vyhodnotení účinnosti vybudovaných prvkov. Vyhodnotenie vychádzalo z výsledkov meraní prvkov geotechnického monitoringu (GTM). Existujúca monitorovacia sieť GTM sa rozšírila v rámci záchranných prác, pričom typ, rozsah, lokácia a periodicita meraní vychádzali z aktuálneho stupňa poznania a observačného charakteru zvoleného postupu riešenia záchranných prác.

Abstract: The paper deals with the geotechnical solution for stabilising the emergency landslide in the village Svätý Anton in the implementation of immediate emergency measures. The emergency landslide presented an immediate risk to the first-class road I / 51, traffic on it, and adjacent objects. The stabilization of the landslide area was solved comprehensively from additional survey works, which specified the engineering geological and hydrogeological conditions of the site, through the proposal of rescue measures to their implementation. The whole solution was conceptually divided into two stages. In the I. stage, the drainage of the landslide area (surface and deep drainage) was designed and implemented. The II. the stage dealt with stabilising of landslide accumulation on the road (retaining wall). The solution of the proposal II. stage was started only after the analysis of the stability situation of the massif after drainage and after the evaluation of the efficiency of the built elements. The assessment was based on the measurements of geotechnical monitoring elements (GTM). The existing GTM monitoring network has been expanded as part of rescue works, with the type, scope, location and periodicity of measurements being based on the current level of knowledge and the observational nature of the chosen rescue works procedure.

Kľúčové slová: zosuvy, sanácia zosuvov, aktivita zosuvov

Key words: landslides, landslide remediation, landslide activity

1. Úvod

V posledných rokoch, vplyvom klimatických zmien, sledujeme stále častejšie vznik svahových deformácií a porúch líniových stavieb. Jedným z podobných prípadov bola **aj havarijná** svahová deformácia v obci Svätý Anton, ktorej sa tento príspevok venuje.

2. Charakteristiky územia pred sanáciou

Havarijný zosuv v obci Svätý Anton dlhodobo ohrozoval štátnu cestu 1. triedy, obytné objekty, inžinierske siete a drobné stavby. Obec sa nachádza v okrese Banská Štiavnica. Zosuv sa vyvinul v spodnej časti západne exponovaného svahu údolia riečky Štiavnica. Svah v predmetnej oblasti je mierny, so sklonom cca 8 °. Územie zosuvu má výrazné morfologické tvary v transportačnej aj akumulačnej oblasti – zvlnený reliéf, vypuklé čelo. Okrem zosuvných pohybov je reliéf územia čiastočne ovplyvnený aj antropogénnou činnosťou – úpravy terénu pri vytváraní záhradiek a výstavbe drobných stavieb. Výrazný antropogénny zásah do reliéfu svahu v minulosti je spojený s výstavbou miestneho futbalového ihriska, kedy došlo k vyrovnaniu terénu čiastočným odrezom a násypom, situovaným vo vzdialenosti cca 75 – 85 m od päty svahu, kde podľa predpokladov sa nachádzala odlučná oblasť starého potenciálneho zosuvu. V priestore ihriska, bola vo vzdialenosti 18,5 m od jeho spodného okraja vyvinutá odtrhová hrana aktívneho zosuvu výšky cca 0,3 – 0,8 m.

Zosuv je registrovaný v Atlase máp stability svahov SR v mierke 1 : 50 000 (Šimeková, Martinčeková a kol., 2006). Podkladom k jeho registrácii bola mapa svahových deformácií v oblasti Antola a okraja Štiavnických vrchov (Stach, J., 1990). Už v tomto mapovom podklade bola v rámci potenciálneho zosuvu registrovaná lokálna aktivita zosuvu v okrajovej časti ihriska (násypová časť). V obci Svätý Anton evidujú výraznejšiu aktivizáciu tohto zosuvu od roku 2009. Obec Svätý Anton vyhlásila dňa 8. 2. 2021 mimoriadnu situáciu pre hrozbu zosuvu svahu nachádzajúceho sa nad miestnou komunikáciou.

Z inžinierskogeologického hľadiska záujmové územie patrí do regiónu neogénnych vulkanitov, oblasti vulkanických hornatín. Rozšíreným javom v území štiavnického stratovulkánu je alterácia hornín, čiže zmena fyzikálnych a chemických vlastností minerálov a hornín zvetrávaním, podzemnými a termálnymi vodami, ktorá spôsobuje degradáciu inžinierskogeologických vlastností.

Predmetné územie patrí do povodia rieky Ipeľ a odvodňuje ho rieka Štiavnica. Územie má charakter vrchovinno-nížinnej oblasti s dažďovo-snehovým typom režimu odtoku. Zvodnenie horninového prostredia neovulkanitov je všeobecne veľmi malé, podzemné vody cirkulujú v puklinovom a puklinovo-medzizrnovom prostredí. Zvodnenie a priepustnosť kvartérnych deluviálnych sedimentov sú závislé od podielu hrubších zrnitejších frakcií. Vyskytujú sa v nich početnejšie, ale málo výdatné pramene.

3. Geologická preskúmanosť územia

V rokoch 2012 – 2013, po predchádzajúcich problémoch s aktivitou zosuvu, obec Svätý Anton zabezpečila vypracovanie „orientačného inžinierskogeologického prieskumu“, ktorého zhotoviteľom bola Katedra inžinierskej geológie Prírodovedeckej fakulty UK v Bratislave (zodpovedný riešiteľ M. Bednarik). V rámci tohto prieskumu boli v zosuvnom území realizované 1 pozdĺžny a 3 priečne geofyzikálne profily, v celkovej dĺžke 564 m (použitá metóda – elektrická odporová tomografia) a pre stabilizovanie územia bolo navrhnuté povrchové odvodnenie. Zároveň boli vybudované pozorovacie geodetické body na povrchové sledovanie svahového pohybu (5 ks). Uvedená práca bola realizovaná bez prieskumných vrtných prác a nespĺňala požiadavky kladené na inžinierskogeologický prieskum zosuvného

územia. Pri návrhu bezodkladných záchranných prác sme z tejto práce čiastočne využili výsledky geofyzikálnych prác.

3.1. Geologická úloha – orientačný prieskum

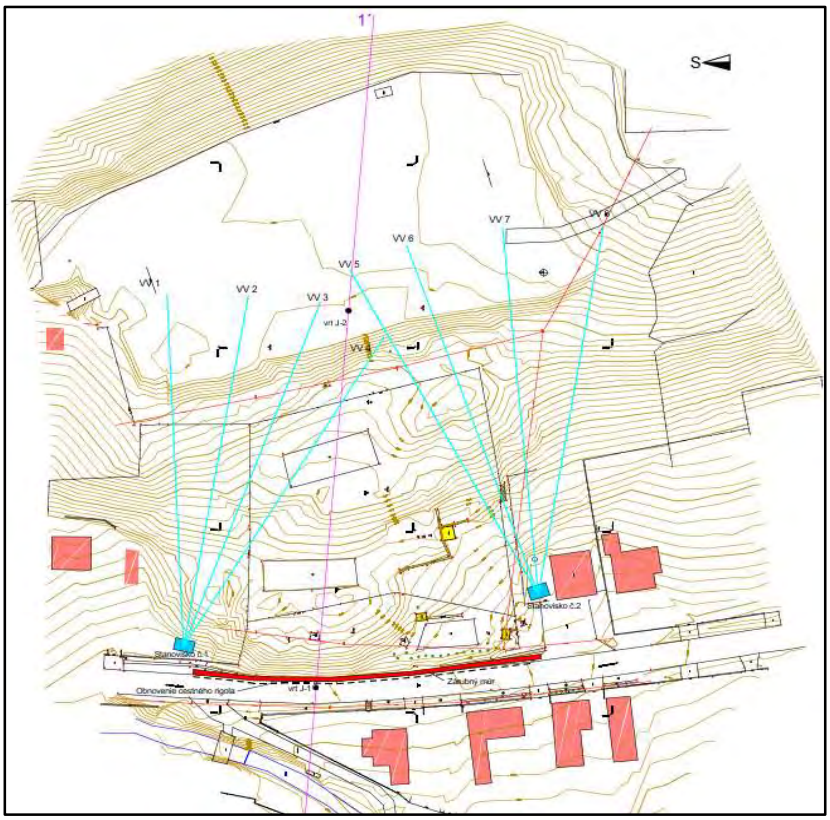
Orientačná etapa inžinierskogeologického prieskumu havarijného zosuvu v obci Svätý Anton bola vypracovaná v roku 2015, vyhodnotila inžinierskogeologické, hydrogeologické a stabilitné pomery zosuvného územia, pričom súčasťou prác bol ideový návrh sanačných opatrení (obr. 2) na zabezpečenie stability predmetného územia.

Realizovanými prieskumnými dielami boli v území havarijného zosuvu v podloží zistené siltovo-piesčité tufy s výskytom polôh, resp. úlomkov až balvanov andezitov. Podložné neogénne vulkanity sú v skúmanom území prekryté kvartérnou vrstvou, pozostávajúcou na svahu z deluviálnych sedimentov – ílov s variabilným podielom úlomkov, ílovito-kamenitých až kamenitých sutí. V okolí potoka Štiavnica sa vyskytujú fluviálne náplavy, v ktorých hlavný podiel majú štrkové sedimenty. Významnú vrstvu z hľadiska inžinierskogeologických pomerov územia predstavujú antropogénne sedimenty – navážky, tvoriace teleso futbalového ihriska a cestné teleso. Na obr. 1 je zobrazené zosuvné územie a akumulácia zosuvu v päte.

Výsledky geologickej úlohy uvádzajú, že havarijný zosuv v Svätom Antone predstavuje reaktivizovanú formu starého potenciálneho zosuvu. Podmienkou jeho vzniku v minulosti bola priaznivá geologická stavba svahu budovaného v oblasti zosuvu neogénnymi jemnozrnnými a piesčitými tufmi, ktoré vplyvom zvetrávacích procesov nadobudli charakter jemnozrnných zemín s nepriaznivými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami. Predpokladáme, že jednou z hlavných príčin vzniku zosuvu bola erózna činnosť potoka Štiavnica. Významným zosuvotvorným faktorom pôsobiacim v zosuvnom území, ktorý napomáhal k evidovaným aktivitám svahových pohybov, boli vztlakové účinky podzemnej vody. Stabilitu územia v oblasti svahovej deformácie negatívne ovplyvnil antropogénny faktor – výstavba ihriska v odlučnej časti zosuvu (obr. 2). Ihrisko bolo vybudované začiatkom sedemdesiatych rokov (ústna informácia od miestnych občanov). Vybudované bolo v čiastočnom odreze a násype, pričom predpokladáme, že násypom ihriska bola priťažená odlučná oblasť zosuvu.

Obr. 1 Pohľad na akumuláciu zosuvu – vľavo (02/2021) a zosuvné územie – vpravo (2015)
Fig. 1 View of landslide accumulation – left (02/2021) and landslide area – right (2015)

Na obr. 2 je ideový návrh spôsobu sanácie odporúčaný orientačným IG prieskumom.



1. Zníženie hladín podzemných vôd pomocou subhorizontálnych odvodňovacích vrtov v počte min 8 ks, v dĺžke cca po 100 m.

2. Návrh odvedenia vody.

3. Ochrana ohrozenej štátnej cesty zárubným múrom v dĺžke cca 90 m.

4. Obnova cestného rigolu, uvažovať s povrchovým odvodnením zosuvného územia.

Obr. 2 Ideový návrh zosuvu z roku 2015
Fig. 2 Idea design of stabilization of the landslide from 2015

3.2 Charakteristika a vývoj havarijného zosuvu

Na základe vyššie uvedeného za hlavné príčiny reaktivizácie zosuvu považujeme:

- **priťaženie odlučnej oblasti zosuvu,**
- **vztlakové účinky podzemných vôd,**
- **nepriaznivé klimatické faktory,**
- **geologické a hydrogeologické podmienky územia.**

Havarijný zosuv mal rozmery cca 110 x 100 m, bazálna šmyková plocha prebieha v hĺbke do 10,8 m, plytšie aktívne šmykové plochy sa vyvinuli v hĺbkach do 8,6 m. Zosuv má výrazné morfologické tvary s detailne zvlneným reliéfom, vytlačenými bočnými valmi, pričom bol výrazným vypuklým čelom natlačený na cestnú komunikáciu.

Predpokladáme, že čiastková šmyková plocha aktívneho charakteru menšej intenzity, vyvinutá na predisponovanej staršej šmykovej ploche, zabieha popod súčasnú cestu až k potoku Štiavnica.

V období pred vykonanými záchrannými prácami pohybom zosuvu došlo v jeho akumulačnej časti k natlačeniu čela k okraju cesty 1. triedy, pričom sa pohybmi zdeformoval a znefunkčnil pozdĺžny cestný rigol. V akumulačnej časti zosuvu bola komunikácia zúžená natoľko, že nevyhovovala predpísanému šírkovému usporiadaniu pre daný typ komunikácie. Komunikácia je v mieste akumulácie zosuvu smerovo vedená v oblúku (zákruta). Kombinácia týchto faktorov: nevyhovujúca šírka komunikácie, ktorá je navyše smerovo vedená v oblúku, pričom akumulácia zosuvu tvorila prekážku vo viditeľnosti a znefunkčnené odvodnenie tvorili vhodné podmienky pre výskyt kolíznych situácií.

V zosuvnej oblasti došlo v roku 2012 k pretrhnutiu vodovodného potrubia, pričom voda z potrubia priamo infiltrovala do zosuvného telesa a zhoršovala tak stabilitnú situáciu.

Prípadným výraznejším aktivovaním zosuvu až zosunutím svahu boli bezprostredne ohrozené súvisiace priľahlé objekty, teleso cesty 1 triedy ale aj účastníci premávky na nej, inžinierske siete situované v akumulácii zosuvu (plynovod, vodovod, elektrické siete, prípadne siete tretích strán) a drobné vybudované stavby na zosuve.

4. Návrh záchranných prác v rozsahu výkonu bezodkladných havarijných opatrení

Vzhľadom na spoločenskú dôležitosť lokality a výsledky meraní geotechnického monitoringu, ktoré identifikovali aktívnu šmykovú plochu (Ondrejka a kol., 2016-2020), bolo nevyhnutné vykonať záchranné opatrenia, ktoré minimalizujú riziká a zvýšia bezpečnosť.

V roku 2015 realizovala spoločnosť GEOKONTAKT, s.r.o. inžinierskogeologický prieskum havarijného zosuvu v obci Svätý Anton. V rámci inžinierskogeologického prieskumu zosuvu boli vyhĺbené 3 jadrové vrty označené JSA-1, JSA-2, INK-1. Vrty JSA-1 hĺbky 13 m a JSA-2 hĺbky 15 m boli zabudované ako hydrogeologické vrty na sledovanie hladiny podzemnej vody. Vrt INK-1 hĺbky 15 m bol zabudovaný ako inklinometrický vrt na sledovanie pohybov v horninovom prostredí. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené parametre monitorovacích vrtov GTM, ktoré boli na lokalite vybudované pred začatím záchranných prác.

V období rokov 2016-až doteraz prebiehal na týchto prvkoch monitoring (Ondrejka a kol., 2016-2020)

Tab. 1 Parametre pôvodných GTM prvkov
Tab. 1 Parameters of the original GTM elements

Označenie vrtu	Typ vrtu	Hĺbka	Súradnice S-JTSK			Poznámka
			X	Y	Z	
INK-1	Zvislý inklinometer	15,0	-435665,740	-1263380,450	412,420	Pôvodný
JSA-1	Hydrogeologický vrt	15,0	-435615,423	-1263389,512	417,849	Pôvodný
JSA-2	Hydrogeologický vrt	15,0	-435639,752	-1263387,870	416,5	Pôvodný

Pre návrh záchranných prác bolo nevyhnutné upresniť inžinierskogeologické a hydrogeologické poznatky o lokalite, teda v prvom rade vykonať doplnkový prieskum. Z dôvodu zabezpečenia relevantného sledovania pohybovej aktivity celého zosuvného územia a pre sledovanie režimu HPV bolo potrebné doplniť do oblasti ďalšie monitorovanie prvky siete GTM. Rozsah, typ a lokácia prvkov bola konzultovaná so zástupcami Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra (ďalej ŠGÚDŠ) a odborným geologickým dohľadom (ďalej OGD – prof. RNDr. Martin Bednarik, PhD.). Na základe komplexnej analýzy a v tom čase dostupných údajov sa definoval nasledovný počet nových GTM prvkov (Tab. 2).

Tab. 2 – Prehľad nových GTM prvkov
Tab. 3 – Overview of new GTM elements

Označenie vrtu	Typ vrtu	Hĺbka	Súradnice S-JTSK			Poznámka
			X	Y	Z	
SVA-1-P	Hydrogeologický vrt	15,0	-435665,450	-1263379,430	412,420	+1x kontinuálny snímač HPV
SVA-2-P	Hydrogeologický vrt	15,0	-435574,990	-1263380,060	424,640	+1x kontinuálny snímač HPV
SVA-3-P	Hydrogeologický vrt	15,0	-435643,860	-1263342,560	415,060	+1x kontinuálny snímač HPV + 1x snímač atmosférického tlaku
SVA-1-INK	Zvislý inklinometer	15,0	-435615,649	-1263387,860	417,849	+ 1x snímač MPT
SVA-2-INK	Zvislý inklinometer	15,0	-435575-189	-1263378,980	424,629	+ 1x snímač MPT
SVA-3-INK	Zvislý inklinometer	15,0	-435643,890	-1263343,460	414,980	+ 1x snímač MPT
Meteostanica	---	---	---	---	---	Zabezpečuje klimatické údaje priamo z lokality zosuvu

Sieť GTM prvkov sa budovala počas prieskumných prác, pričom monitorovacie vrty boli realizované na jadro s ukladaním do vzorkovníc a inžinierskogeologický zdokumentované spolu s údajmi o narazenej a ustálenej HPV.

Na základe informácií získaných z doplnkových a predchádzajúcich geologických prieskumných prác sa návrh záchranných opatrení sekvenčne rozdelil na 2 etapy:

- I. Etapa – odvodnenie
- II. Etapa – zárubný múr

4.1 Odvodnenie

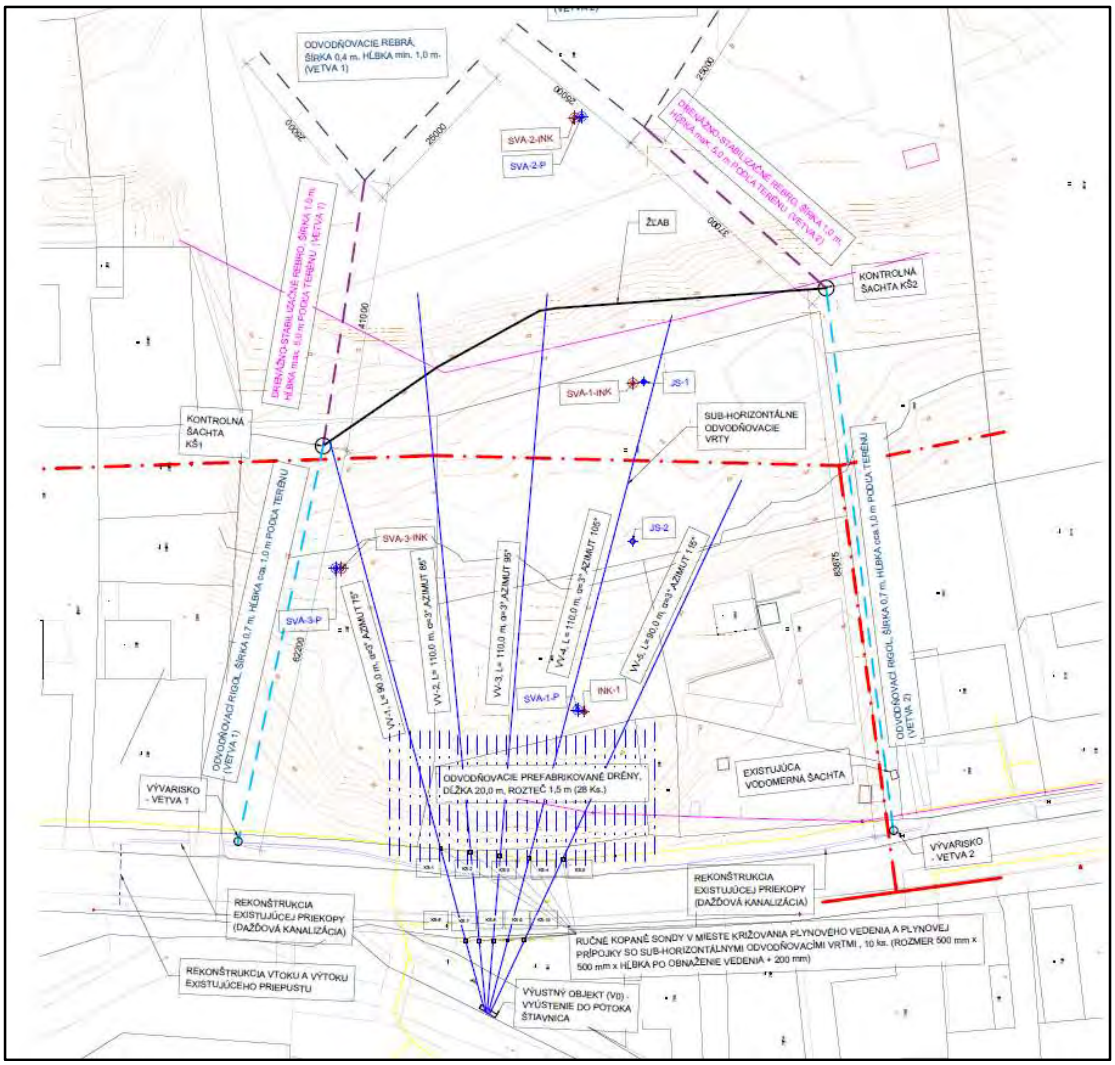
V rámci I. etapy bol navrhnutý a zrealizovaný drenážny systém svahu, ktorý sa skladá z **hĺbkového a povrchového** odvodnenia masívu. Z hľadiska stabilizácie svahu bolo kľúčové znížiť vztlakové účinky podzemných vôd (znížiť úroveň HPV v masíve).

Finálny návrh záchranných prác je zobrazený na obr.3, pričom pozostával z nasledovných prvkov:

Na odvodnenie akumulácie v kontakte so štátnou cestou sa použili ***prefabrikované zarážané odvodňovacie drény ZUBOR*** pozostávajúce z inštalačnej oceľovej hlavy a geokompozitného drenážneho pásu šírky 200 mm, dĺžky 20,0 m. Boli zrealizované vo vzdialenostiach 1,50 m v sklone min. 3 stupne pomocou zarážania hydraulickým kladivom na pásovom podvozku. Ich funkciou je zníženie vlhkosti zeminy a plytších hladín podzemných vôd a tým stabilizácia čela akumulácie riešeného zosuvu. Prefabrikované odvodňovacie drény boli vyvedené na povrch svahu.

Subhorizontálne odvodňovacie vrty slúžia na odvodnenie hlbších polôh (priestoru v okolí identifikovanej šmykovej plochy), vrty boli hĺbené z jedného stanovišťa, bolo zrealizovaných 5 kusov subhorizontálnych vrtov, celkom 510 m. **Finálne umiestnenie odvodňovacích vrtov vychádzalo z doplnkových informácií** o režime HPV zosuvného územia, získaných z realizácie nových vrtov GTM v oblasti. Vďaka týmto informáciám sa z pôvodných dvoch štartovacích stanovíšť a výpustných objektov zvolilo len jedno stanovište. Miesto muselo byť vzhľadom k morfologickým podmienkam a priebehu identifikovaných šmykových plôch situované výškovo čo najnižšie. Z tohto hľadiska sa muselo vŕtať takmer z úrovne potoka Štiavnica. Práce boli zrealizované v zmysle požiadaviek správcu potoka Štiavnica a v súlade so schváleným protipovodňovým plánom.

Odvodňovacie rebrá sú navrhnuté na drénovanie priestoru ihriska, ktoré prestavuje veľkú infiltračnú plochu v odlučnej oblasti zosuvu. Pri návrhu bola zohľadnená dĺžka zosuvu, strmosť terénu, možnosť prístupu stavebných mechanizmov a dovozu materiálu. Na drénovanie priestoru ihriska boli navrhnuté 4 ks odvodňovacích rebier, šírky 0,4 m a premenlivej hĺbky.



Obr. 3 Návrh záchranných prác – I. etapa
Fig. 3 Design of rescue work – I. stage

Sanačné stabilizačno-drenážne svahové rebrá slúžia na odvodnenie antropogénneho strmého svahu prestavujúceho pätu svahu násypu futbalového ihriska, nachádzajúceho sa v odlučnej oblasti zosuvného územia. Na kontrolu funkčnosti stabilizačno-drenážnych rebier budú slúžiť kontrolné šachty.

Odvodňovací žľab je vybudovaný za účelom zachytenia prívalových povrchových vôd a eliminácie ich infiltrácie do telesa zosuvu. Odvodňovací žľab zohľadňuje morfológiu terénu, je situovaný v päte strmého svahu futbalového ihriska. Odvodňovací žľab je zhotovený z betónových žľabov. Vody z odvodňovacieho žľabu sú zaústené do kontrolných šácht KŠ1 a KŠ2 a následne plným potrubím odvodňovacích rigolov zaústené do existujúcich recipientov. Kontrolné šachty KŠ1 a KŠ2 slúžia na kontrolu funkčnosti zrealizovaných drenážnych rebier a ich údržbu.

Vzhľadom na fakt, že ílovité zeminy sú citlivé na riziko vzniku erózie, najmä ronovej, za vzniku eróznych rýh od zrážkových povrchových vôd. Bola zrealizovaná rekultivácia sanáciou dotknutých plôch – ohumusovanie a zatrávnenie reprofilovanej plochy. Na zatrávnenie bola použitá ***protierózna georohož*** na ochranu povrchu svahu počas zakorenenia trávneho porastu.

Nižšie je uvedená vybraná fotodokumentácia z realizácie záchranných prác – I. etapa odvodnenie (obr. 4).

Obr. 4 Fotodokumentácia z realizácie – I. etapy
Fig. 4 Photo documentation from the implementation – I. stage

Prefabrikované drény

Budovanie sub-horizontálnych vrtov

Drenážno stabilizačné rebro – vetva č.1

Kontrolná šachta – KŠ 1

Odvodňovací žľab

Rekultivácia terénu

Rekultivácia terénu

4.2 Vyhodnotenie účinností I. etapy.

Pre interpretovanie účinnosti odvodňovacieho systému zosuvu bolo dôležité predovšetkým zníženie úrovne HPV v masíve. Režim HPV v masíve bol sledovaný prostredníctvom 5 pozorovacích hydrogeologických vrtov a 3 snímačov pórového tlaku.

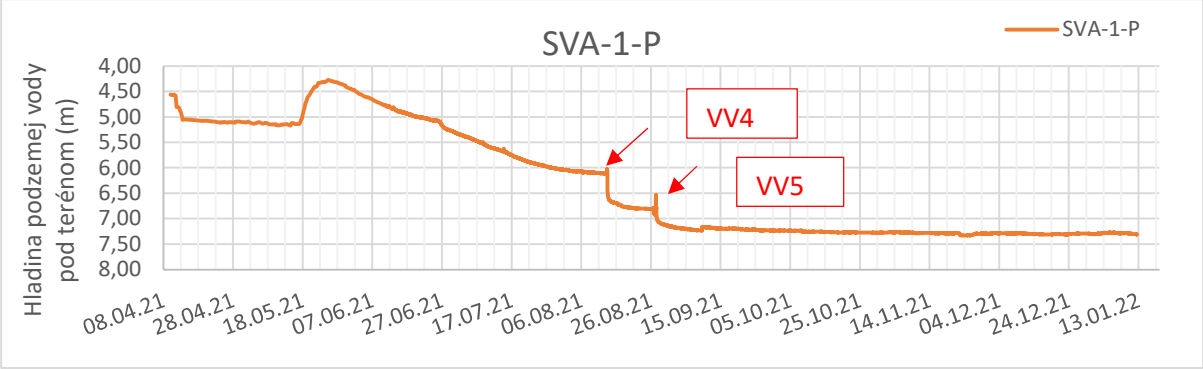
Účinnosť systému hĺbkového odvodnenia masívu sa preukázala už počas jeho realizácie, kedy bol v pozorovacích vrtoch zachytený skokový pokles úrovne HPV. Horizontálny odvodňovací vrt VV1 prechádza v blízkosti piezometrického vrtu SVA-3-P, pričom počas jeho realizácie došlo k skokovému poklesu úrovne HPV približne o 3,8 m. Výrazný pokles bol zapríčinený odvodnením vrstvy tvorenej silne zvetraným až zvetraným andezitom s výrazným zastúpením jemnozrnnej výplne tvorenej pieskom siltovitým a siltom piesčitým, v ktorej bol narazený druhý horizont napätej hladiny podzemnej vody. Výraznejšie zmeny nastali aj počas realizácie horizontálnych odvodňovacích vrtov VV4 a VV5, počas ktorej bolo zaznamenané krátkodobé zvýšenie úrovne HPV, zapríčinené technickou vodou z vŕtania a po ukončení realizácie vrtu nastal pokles úrovne HPV.

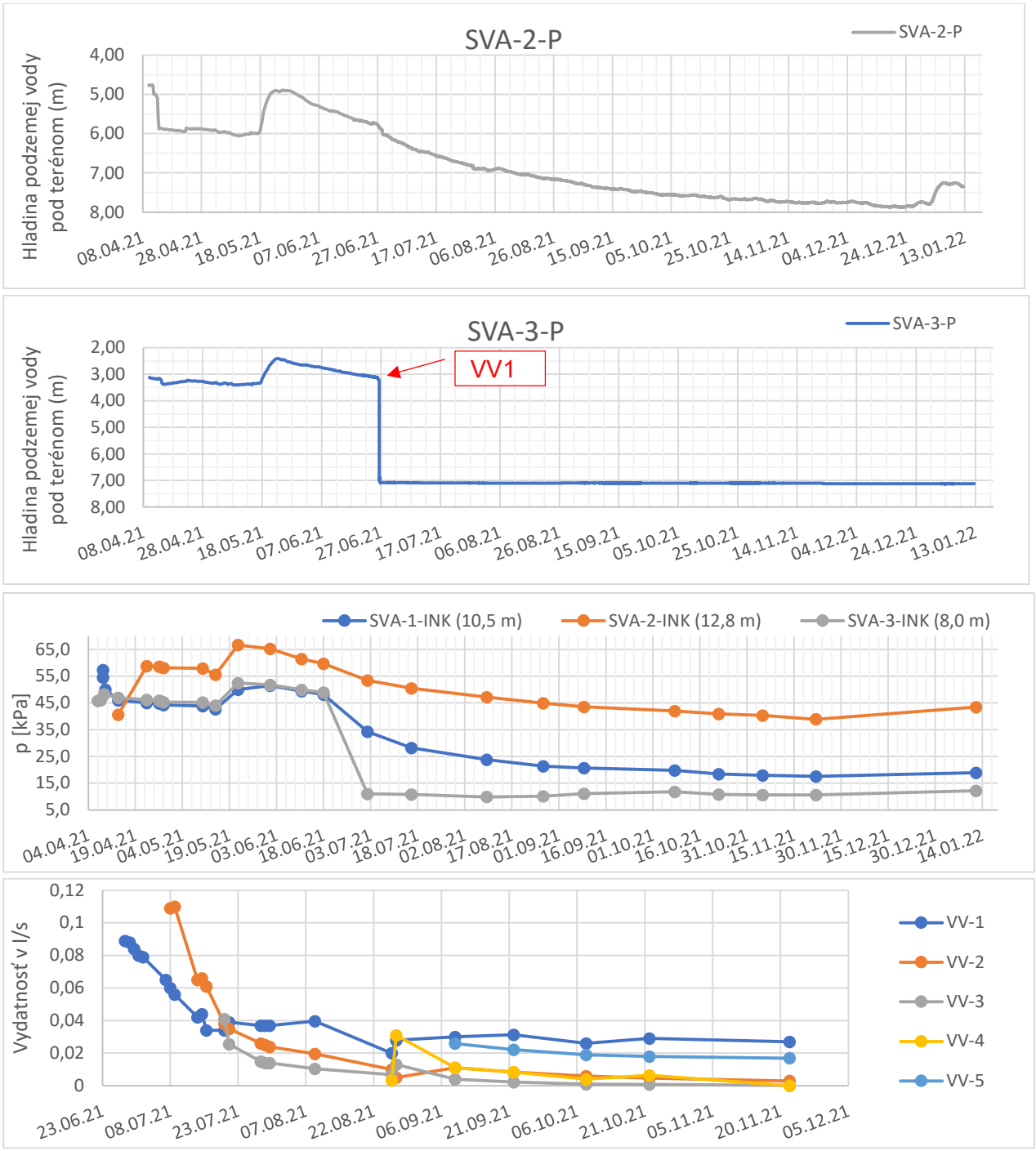
Režim HPV bol v masíve monitorovaný aj prostredníctvom 3 snímačov pórových tlakov. Snímače pórových tlakov boli nainštalované v novovybudovaných inklinometrických vrtoch: SVA-1-INK, SVA-2-INK a SVA-3-INK (viď obr. 5). V snímačoch vo vrtoch SVA-1-INK a SVA-3-INK, ktoré sa nachádzajú v telese zosuvu, bol zaznamenaný pomerne strmý pokles pórových tlakov, pričom sa hodnoty tlaku ustálili vo vrte SVA-1-INK na úrovni približne **15,0 kPa** a vo vrte SVA-3-INK na úrovni cca **10,0 kPa**. V snímači vo vrte SVA-1-P bol nameraný postupný trend poklesu pórového tlaku s ustálením sa približne na úrovni **40,0 kPa.**

Po ukončení odvodnenia v rámci I. etapy (09/2021) nebolo zaznamenané významnejšie vystúpanie HPV v masíve do konca monitorovacieho obdobia (12/2021).

V rámci záchranných prác I. etapy sa monitorovala aj výdatnosť vybudovaných odvodňovacích vrtov. Spočiatku u všetkých vrtov bola meraniami overená výraznejšia výdatnosť, čo je najviac zreteľné u vrtov VV1 (0,088 l/s), VV2 (0,11 l/s) a VV3 (0,041 l/s). Postupne ako sa budovali vrty (od VV1 po VV5) a odvodňoval sa masív klesala jednak výdatnosť každého vrtu, a jednak sumárna výdatnosť všetkých vrtov v stanovišti (viď obr. 6). Maximálne hodnoty sumárnej výdatnosti boli dosahované po zrealizovaní vrtu VV3 na začiatku júla, a to približne **0,17 l/s**. Sumárna výdatnosť sa ku konci sledovaného obdobia ustálila na úrovni približne **0,05 l/s.**

Nižšie na obr. 5 sú uvedené výsledky režimových meraní HPV v pozorovacích vrtov v masíve a výdatností z odvodňovacích vrtov.





Obr. 5 Výsledky režimových meraní hladiny podzemnej vody
Fig. 5 Results of regime measurements of groundwater level

Na základe analýzy výsledkov monitoringu režimu HPV v masíve a výdatností odvodňovacích vrtov je jednoznačne preukázaná účinnosť zrealizovaného odvodňovacieho systému záchranných prác.

Súbežne s meraním režimu HPV a výdatnosťou odvodňovacích vrtov boli v pravidelných intervaloch realizované aj merania horizontálnych deformácií masívu a jeho pohybová aktivita. Počas prác a ani po ich ukončení neboli zaznamenané výraznejšie prírastky horizontálnych deformácií masívu.

4.1 Sanácia zosuvného územia

Po vyhodnotení výsledkov GTM sa pristúpilo k návrhu a následnej realizácii stabilizačnej konštrukcie v päte akumulácie. Záchranné práce boli navrhnuté ako dvojstupňová konštrukcia. Účelom konštrukcie je odstránenie a zabezpečenie akumulačnej časti zosuvu, ktorá bola natlačená k okraju cesty 1. triedy, pričom došlo k znefunkčneniu odvodnenia cestnej komunikácie. Navrhnutá bola pružná, stabilizačná a súčasne priepustná konštrukcia, ktorá nebráni odvodňovaniu akumulácie. Oba stupne zabezpečenia sú tvorené z kotvenej oceľovej stabilizačnej konštrukcie. Systém sa skladá z priestorovej nosnej oceľovej konštrukcie. Čelo predstavuje oceľový rám z prvkov HEA100 s ochrannou sieťou, rozmer čela je 2,50 x 2,00 m (celkovo 40 ks). V telese zásypu je skryté nosné ťahadlo – zemná kotva. Stabilizačná konštrukcia sa realizovala postupným ukladaním prefabrikovaných prvkov vedľa seba v pripravenej základovej jame, následným vzájomným spájaním prvkov a ich ukotvením. Výška spodného a horného stupňa je 2,5 m. Sklon líca konštrukcie 10 stupňov. Pohľadová poddajná lícna časť je tvorená čelnými panelmi rozmeru 2 x 2,5 m, vyplnenými štrkodrvou. Práce boli realizované v päte etapovitou výstavbou. Po vyplnení stabilizačných prvkov a ich zabezpečení voči posunu sa pristúpilo k otvoreniu nasledujúcej sekcie stavebnej jamy. Po vyplnení stabilizačných konštrukcií nasledovalo ich ukotvenie. Na ukotvenie oceľovej stabilizačnej konštrukcie boli navrhnuté kotevné prvky vo forme injekčných zavŕtavacích kotevných tyčí so stratenou korunkou. Dĺžka každej kotvy bola 10 m. Oceľové prvky sú medzi sebou prepojené prostredníctvom špeciálnych spojok, ktoré sú ukotvené do masívu zvislými kotvami, dĺžky 2,0 m (obr. 6).

Stabilizačná oceľová konštrukcia je na jej začiatku a konci ukončená pomocou gravitačných gabiónových oporných múrikov (obr. 7). Súčasťou prác bola aj úprava cestného telesa a odvodnenia v predmetnej dĺžke podľa požiadaviek správcu.

Obr. 6 Realizácia kotvenia oceľového elementu
Fig. 6 Realization of anchoring a steel element

Obr. 7 Pohľad na stabilizačnú oporná konštrukciu
Fig. 7 View of the stabilizing retaining wall

5. Záver

Príspevok sa venoval záchranným prácam v rozsahu výkonu bezodkladných havarijných opatrení svahovej deformácie na lokalite Svätý Anton. Mimoriadna situácia bola v obci vyhlásená dňa 8. 2. 2021, pričom súbor prípravných činností na realizáciu doplnkových prieskumných a projektových prác začal bezodkladne dňa 9. 2. 2021. V rámci prieskumných prác bola doplnená už existujúca monitorovacia sieť prvkov GTM. Na základe poznatkov získaných z historických geologických úloh, štúdia všetkých dostupných informácií a doplnkových prieskumných prác sa pristúpilo k diverzifikácii záchranných prác na 2 etapy. I. etapa sa venovala návrhu a realizácii systému povrchového a hĺbkového odvodnenia. Po zhodnotení vybudovaného odvodnenia prostredníctvom výsledkov kontrolných meraní GTM sa pristúpilo k návrhu a následnej realizácii II. etapy, teda zárubnej konštrukcie v päte akumulácie.

Návrh a samotná realizácia I. aj II. etapy kládli vysoký dôraz na koordinačnú a inžiniersku činnosť. Práce boli realizované v intraviláne obce Svätý Anton počas premávky, ktorá bola regulovaná dočasným dopravným určením. V zosuvnom území sa nachádzali inžinierske siete, ako plynovod (v päte akumulácie), elektrické vedenie a vodovod. Záchranné práce museli byť vykonávané v ich blízkosti, poprípade aj v ich ochranných pásmach. Projektovanie a realizácia záchranných prác si vyžadovali úzku kooperáciu s dotknutými subjektmi (obec, správcovia sietí, komunikácie, potoka Štiavnica, miestni obyvatelia, ...).

Záchranné práce uvedené v príspevku, od prípravy, doplnkového prieskumu, rozšírenia siete GTM, projektovania a realizácie boli vykonané za relatívne krátke obdobie (03/2021 – 12/2021).

Na záver je možné konštatovať, že *záchrannými prácami v rozsahu výkonu bezodkladných havarijných opatrení svahovej deformácie na lokalite Svätý Anton* bola eliminovaná mimoriadna situácia.

Zoznam literatúry

Csizmadia, R., Mažgut, M., Sňahničan, J., Prelovský, B., Pleško, M., Laurenčík, J., Coplák, M., 2019: Záverečná správa – Záchranné práce v rozsahu výkonu bezodkladných havarijných opatrení svahovej deformácie na lokalite Svätý Anton – I. etapa.

Ondrejka, P., a kol., 2016, 2017, 2018, 2019, 2020: ČMS GF, Posystém 01Zosuvy a iné svahové deformácie, Ročná správa, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra.

GEOKONTAKT, s.r.o. ,2015: Inžinierskogeologický prieskum havarijného zosuvu v obci Svätý Anton a sanácia havarijných zosuvov v obciach Nižná Myšľa a Šenkvice. Časť III. Inžinierskogeologický prieskum havarijného zosuvu v obci Svätý Anton.

Bednarik, M., a kol., 2013: Orientačný inžinierskogeologický prieskum zosuvu v Svätom Antone. Katedra inžinierskej geológie Prírodovedeckej fakulty UK v Bratislave.

Kolektív autorov, 2002: Atlas krajiny SR. MŽP SR Bratislava

Konečný, V., a kol., 1998: Geologická mapa regiónu Štiavnických vrtov a Pohronského Inovca v M 1 : 50 000. GS SR, Bratislava.

Stach, J., 1990: Antol – okraje Štiavnických vrchov a Krupinskej vrchoviny. Orientačný inžinierskogeologický prieskum. Geoindustria Brno.

Šimeková, J., Martinčeková, T., a kol., 2006 Atlas máp stability svahov SR v M 1 : 50 000.

SANÁCIA AKTÍVNEHO ZOSUVU V OBCI MALÁ ČAUSA

REMEDIATION OF ACTIVE LANDSLIDE IN MALÁ ČAUSA MUNICIPALITY

Júlia Šimeková[1], Pavol Tupý[2], Michal Páleník[1], Jozef Sňahničan[3]

[1]Geotrend, s.r.o., Predmestská 75, 010 01 Žilina, Slovenská republika,
e-mail: geotrend@geotrendza.sk
[2]ENVIGEO, a.s., Kynceľová 2, 974 11 Banská Bystrica, Slovenská republika, e-mail: tupy@envigeo.sk
[3]GEOSOUL, s.r.o., Rusovská cesta 13, 851 01 Bratislava, Slovenská republika,
e-mail: jozef.snahnican@geosoul.sk

Abstrakt: V jesennom období roku 2020 došlo v obci Malá Čausa k vzniku zosuvu, ktorý bezprostredne ohrozil novostavbu rodinného domu, poškodil oplotenie a časť upraveného pozemku. V prípade ďalšieho retrográdneho rozširovania svahového pohybu smerom do svahu by zosuv ohrozoval aj ďalší rodinný dom a drobné stavby. Vo februári 2021 bol na zosuve realizovaný inžinierskogeologický prieskum, ktorého výsledkom bol návrh stabilizačných opatrení a vypracovanie projektu sanácie geologického prostredia. V období máj – jún 2021 bola realizovaná sanácia aktívneho zosuvu a v lokalite mohla byť odvolaná mimoriadna situácia.

Abstract: In the autumn of 2020, a landslide occurred in the village of Malá Čausa, which immediately endangered the new construction of a family house, damaged the fencing and part of the landscaped land. In the case of further retrograde expansion of the slope movement upslope, the landslide could also pose a threat to another family house and auxiliary buildings. In February 2021, an engineering geological survey was carried out on the landslide, which resulted in a proposal for stabilization measures and the elaboration of a project for the remediation of the geological environment. In the period May-June 2021, the remediation of the active landslide was carried out and an emergency situation in the locality could be called off.

Kľúčové slová: zosuv, sanácia, stupeň stability, drenážno-stabilizačné rebro, stabilizačná oceľová konštrukcia.

Key words: landslide, remediation, degree of slope stability, drainage-stabilization rib, stabilizing steel structure.

1. Úvod

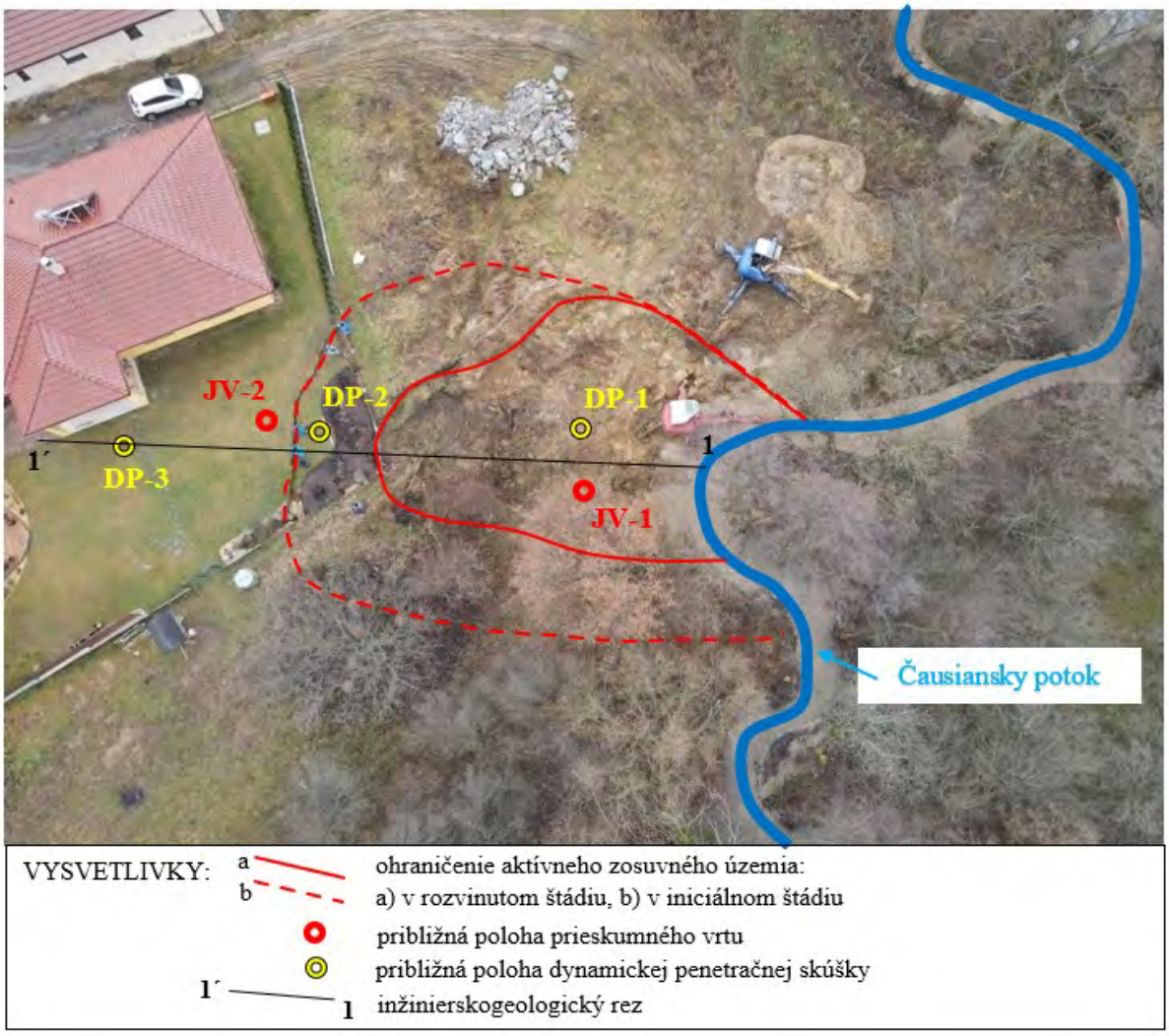
Na Slovensku dochádza takmer každoročne k vzniku zosuvov alebo iných svahových deformácií aj priamo v intravilánoch obcí. Tieto zosuvy často ohrozujú obytné či hospodárske objekty, komunikácie a inú infraštruktúru obce a je nutné ich stabilitné zabezpečenie. Obce pritom zápasia s množstvom problémov, z ktorých ako kľúčové sa javí predovšetkým finančné krytie potrebných geologických prieskumných a sanačných prác a zabezpečenie ich odborného prevedenia. V obci Malá Čausa trvalo obdobie od registrácie prvotného zosuvného pohybu po zabezpečenie stability porušeného svahu cca 7 mesiacov, od novembra 2020 do júna 2021.

2. Charakteristika svahovej deformácie

Svahová deformácia, ktorá bola predmetom sanácie, bola na základe vykonaného inžinierskogeologického prieskumu (Tupý a kol., 2021) klasifikovaná ako aktívny zosuv plošného tvaru, v rozvinutom a iniciálnom vývojovom štádiu (obr. 1 až 3). Zosuv vznikol na úpätí ľavého svahu Čausianskeho potoka, v území plošne rozsiahlejšieho pravdepodobne už stabilizovaného zosuvu staršej generácie, s menej zreteľnými morfologickými hranicami a znakmi, ktorý bol podrobnejšie skúmaný pred výstavbou rodinných domov v lokalite (Jadroň a Surový, 2012). Aktívny zosuv sa rozvinul na celkovej ploche cca 22 × 22 – 23 m.

Vznik svahových pohybov v území primárne podmieňuje priaznivá geologická stavba dotknutého svahu, ktorý je budovaný ílovitými zeminami a slabo spevnenými poloskalnými horninami s nepriaznivými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami. Ako hlavné príčiny vzniku aktívneho zosuvu boli stanovené:

- dlhodobé odľahčovanie päty svahu bočnou eróziou Čausianskeho potoka (nárazový breh meandra) a zostrmenie svahu v erodovanom úseku,
- dotácia zemín v kritickom úseku svahu vodou infiltrovanou z upravenej rovinnej plochy, prípadne aj z vyšších častí svahu.
- priťaženie svahu nad eróznym úsekom potoka zeminou z terénnych úprav v okolí domu.



Obr. 1 Situácia zosuvu a realizovaných prieskumných diel na fotografii z dronu zo dňa 5.1.2021
Fig. 1 The situation of the landslide and the realized survey works in the photo from the UAV dated 5. 1. 2021

Obr. 2 Odlučná oblasť zosuvu (fotografia z dronu 5. 1. 2021)
Fig. 2 Head scarp of landslide area (UAV photo 5. 1. 2021)

Obr. 3 Zosuv v čase terénnych prieskumných prác 1. 2. 2021
Fig. 3 Landslide at the time of survey 1 .2. 2021

3. Stručné zhodnotenie inžinierskogeologických pomerov

V rámci inžinierskogeologického prieskumu zosuvného územia boli realizované 2 vrty hĺbky 7 a 10 m, 3 dynamické penetračné skúšky hĺbky 7 až 8 m, odobrané a laboratórne

testované vzorky zemín v počte 6 kusov a 1 vzorka vody. Zostrojený bol jeden pozdĺžny inžinierskogeologický rez, označený 1-1´ (obr. 4).

Zistené bolo, že zosunuté zeminy (zosuvné delúviá) tvoria väčšinou íly s vysokou plasticitou (trieda F8, symbol CH), menej íly so strednou plasticitou (trieda F6, symbol CI). V odlučnej oblasti a nad najvyššou odlučnou hranou boli zistené na povrchu aj antropogénne uloženiny, ktorými bol vyrovnaný pôvodne sklonený terén. Overené boli ako íly so strednou plasticitou (trieda F6, symbol CIY).

V akumulačnej oblasti sú zosuvné delúviá nasunuté na fluviálnych sedimentoch, ktoré majú vo vrchnej časti charakter jemnozrnnej ílovitej zeminy (trieda F8, symbol CH), v spodnej časti boli overené štrkovité zeminy (trieda G5, symbol GC a trieda G3, symbol G-F). Celková overená hrúbka fluviálnych sedimentov bola 1,6 m (dynamickou penetračnou skúškou) a 2,4 m (jadrovým vrtom).

V podloží kvartérnych sedimentov (zosuvných delúvií a fluviálnych sedimentov) boli zistené terciérne sedimenty, vo vrchných častiach zastúpené ílmi so strednou až vysokou plasticitou (trieda F6 – F8, symbol CI – CH). V hlbších častiach overeného horninového prostredia boli zistené slabo spevnené ílovce s polohami slabo spevnených jemnozrnných pieskovcov, ktoré vzhľadom na ich veľmi nízke pevnosti bolo možné hodnotiť ako zeminy (trieda F6, symbol CI a trieda S5, symbol SC).

Zosuvné delúviá boli zistené do hĺbky 3,4 – 5,3 m, pričom aktívne šmykové plochy boli o niečo plytšie. Hlavná aktívna šmyková plocha bola prieskumnými dielami identifikovaná v hĺbke 2,6 – 3,3 m. V približne zhodnej hĺbke bola identifikovaná aj počas realizácie sanačných prác vo výkope ryhy pre hlavnú vetvu drenážno-stabilizačného rebra.

4. Výsledky stabilitných výpočtov

Výpočty stupňa stability boli realizované v inžinierskogeologickom reze 1-1´ (obr. 4), na aktívnej šmykovej ploche A – B (dlhšia) a aktívnej šmykovej ploche A´ – B (kratšia). Vo výpočtoch bol uvažovaný stav pred realizáciou sanačných opatrení (obr. 1 až 3), a to pre suchý svah a svah s hladinou podzemnej vody zistenou v čase prieskumu a stav po realizácii sanačných prác (obr. 5, 9).

Parametre šmykových pevností použité do výpočtov boli určené na základe výsledkov laboratórnych šmykových skúšok a korelačných vzťahov medzi indexom plasticity a šmykovou pevnosťou jemnozrnných zemín podľa Kenney a Bjerrum. Do výpočtov boli použité nasledujúce hodnoty:

φ_{rez} = 14,0 °

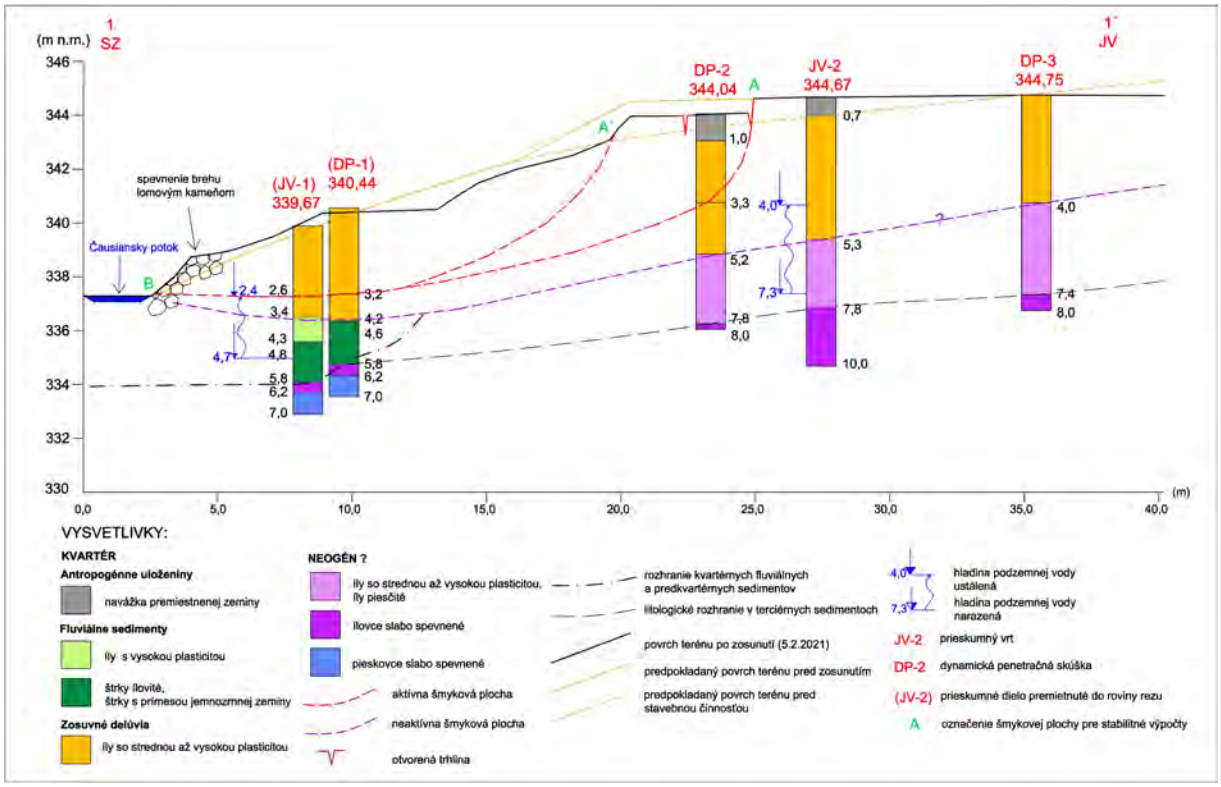
c_{rez} = 0,0 kPa

γ = 19,5 kN.m^{-3}

Výpočty boli realizované pomocou programu GEO5 (FINE spol. s r.o.) Sarmovou metódou. Výsledky stabilitných analýz sú prezentované v tab. 1.

Tab. 1 Výsledky stabilitných analýz
Tab. 1 Results of stability analyses

Inžiniersko-geologický rez	**Šmyková plocha**	**Stupeň stability F_s**		
		pred sanáciou		**po sanácii**
		suchý svah	**svah s hladinou podzemnej vody**	**svah s hladinou podzemnej vody**
1 – 1´	A – B	1,01	0,98	1,27
	A´ – B	1,04	1,01	1,16



Obr. 4 Inžinierskogeologický rez 1-1´
Fig. 4 Engineering geological cross-section

Z vypočítaných stupňov stability pred sanáciou vyplynulo, že stabilita územia je nízka pre obe šmykové plochy aj v prípade suchého svahu, teda bez pôsobenia podzemnej vody (F_s = 1,01 – 1,04). Pri uvažovaní prítomnosti podzemnej vody tesne nad interpretované šmykové plochy sa územie stávalo nestabilným (F_s = 0,98 – 1,01). Vypočítané nízke stupne stability odpovedali vtedajšiemu reálnemu stavu územia, v ktorom boli aj vizuálne pozorované čerstvé prejavy svahových pohybov. Z vykonaných stabilitných analýz bolo zrejmé, že pre zabezpečenie stability územia nebude postačovať iba odvodnenie územia.

Navrhnuté sanačné práce boli zamerané na odstránenie havarijného stavu a záchranu rodinného domu. Orientované boli na priťaženie akumulačnej časti zosuvu, odvodnenie a čiastočnú stabilizáciu telesa zosuvu drenážno-stabilizačným rebrom a stabilizáciu hornej časti zosunutého svahu stabilizačnou konštrukciou. Jednotlivé sanačné prvky sú podrobnejšie charakterizované v kapitole 6. Ich realizáciou sa stupeň stability svahu zvýšil na 1,27 (v reze A – B), resp. 1,16 (v reze A´ – B).

5. Postup stabilitného zabezpečenia svahu

Od vzniku aktívneho zosuvu po jeho stabilitné zabezpečenie došlo v obci Malá Čausa k vykonaniu nasledujúcich činností:

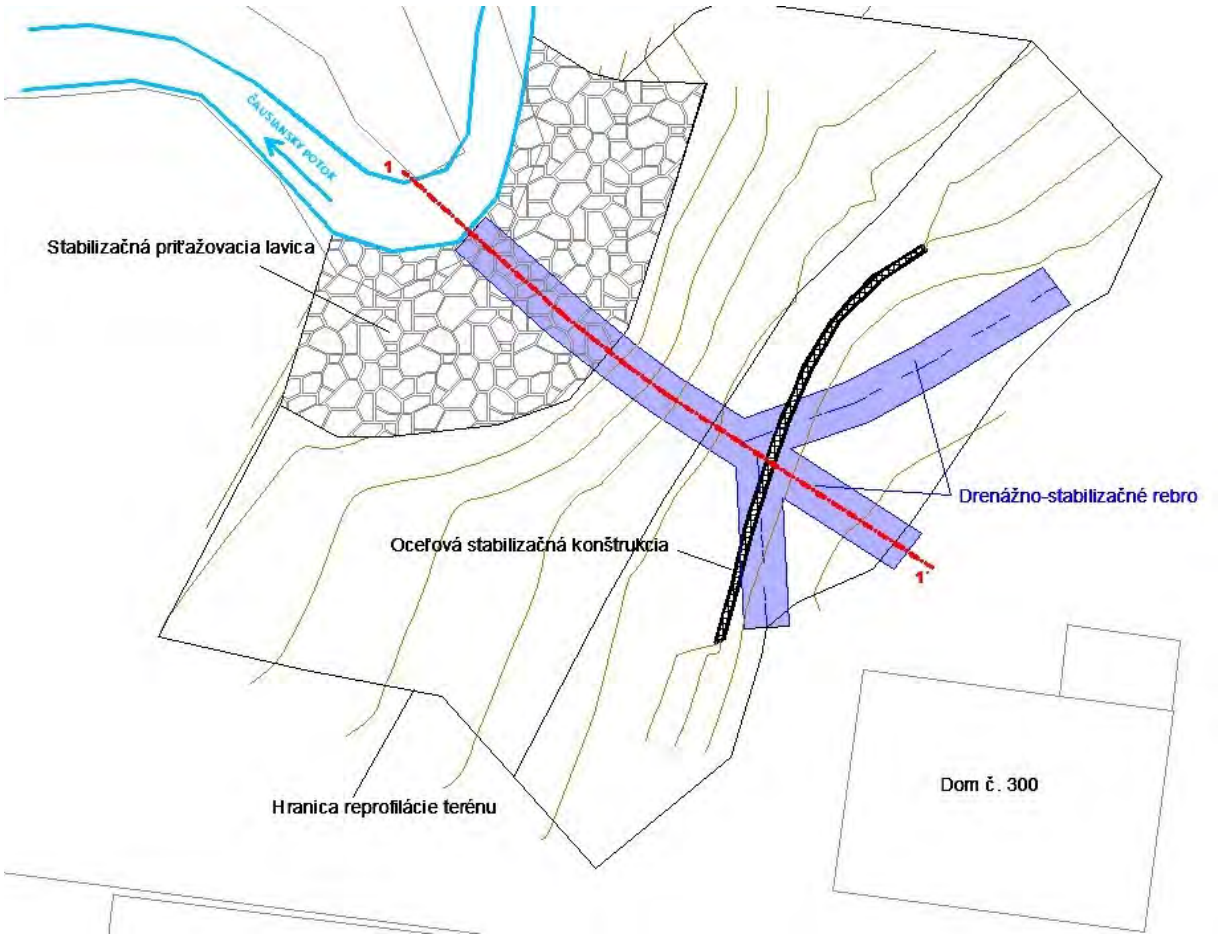
1. Nahlásenie vzniku svahovej deformácie – november 2020.
2. Vyhlásenie mimoriadnej situácie – 4. 12. 2020.
3. Realizácia prvotných zabezpečovacích opatrení:
   - odstránenie zeminy zosunutej do koryta potoka a spevnenie brehu potoka lomovým kameňom (realizované správcom toku v decembri 2020),

- vyrozumenie dotknutých orgánov a miestnych obyvateľov, prekrytie odlučnej oblasti zosuvu nepriepustnou textíliou, ohraničenie zosuvu opáskovaním – december – január 2021.

4. Vykonanie terénnej obhliadky a vypracovanie „Obhliadkovej správy“ pracovníkmi ŠGÚDŠ za prispenia Dr. D. Jadroňa – január 2021.
5. Realizácia inžinierskogeologického prieskumu – január až február 2021 (zhotoviteľ ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica).
6. Vypracovanie projektu sanácie geologického prostredia – február 2021 (projekt sanácie bol súčasťou záverečnej správy z inžinierskogeologického prieskumu).
7. Realizácia sanačných prác – 24.5. – 18.6.2021 (zhotoviteľ ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica).
8. Vypracovanie záverečnej správy zo sanácie geologického prostredia a odvolanie mimoriadnej situácie – jún 2021.

6. Realizované sanačné práce

Sanácia porušeného svahu bola zabezpečená vybudovaním stabilizačnej priťažovacej lavice v päte svahu, vetveného drenážno-stabilizačného rebra po celej dĺžke aktívneho zosuvu, stabilizačnej oceľovej konštrukcie a realizáciou terénnych úprav. Všetky realizované sanačné práce boli podrobne vyhodnotené v záverečnej správe zo sanácie geologického prostredia (Tupý a kol., 7/2021). Graficky sú znázornené na obr. 5.



Obr. 5 Realizované sanačné opatrenia
Fig. 5 Implemented remediation measures

6.1 Stabilizačná priťažovacia lavica

Stabilizačná priťažovacia lavica bola zhotovená z ťažkého lomového kameňa v päte zosuvného svahu, ktorý súčasne predstavuje ľavý breh Čausianskeho potoka. Na previazanie priťažovacej lavice s existujúcim svahom bolo vytvorené zazubenie, ktoré bolo realizované postupne s narastaním výšky priťažovacej lavice. Stavebná jama pre priťažovaciu lavicu bola otváraná postupne na etapy (ako 4 samostatné úseky) s následným zasypaním ťažkým lomovým kameňom, tak aby nebola ohrozená stabilita svahu (obr. 6). Vybudovaná priťažovacia lavica má oblúkový priebeh s dĺžkou na vnútornej strane 15,5 m, na vonkajšej strane cca 28,5 m, jej celkový objem je cca 280 m^3. Povrch priťažovacej lavice bol urovnaný, medzery medzi hrubým lomovým kameňom vyštrkované a zaklinované menšou frakciou (obr. 9).

Obr. 6 Realizácia stabilizačnej priťažovacej lavice v mieste napojenia na drenážno-stabilizačné rebro (31. 5. 2021)

Fig. 6 Implementation of a stabilizing gravity fill at the point of connection to the drainage-stabilizing rib (31. 5. 2021

6.2 Drenážno-stabilizačné rebro

Drenážno-stabilizačné rebro pozostáva z hlavnej (centrálnej) vetvy a dvoch bočných vetiev. Realizované bolo po menších úsekoch, v smere proti spádu vody, v dvoch etapách. V prvej etape bola vybudovaná spodná časť centrálnej vetvy rebra, od brehu koryta potoka do vzdialenosti cca 10 m od okraja koryta potoka, t.j. v úseku prepojenia s priťažovacou lavicou a tesne za lavicou (obr. 7). Táto časť rebra bola budovaná bezprostredne po realizácii prípravných prác, ešte pred vybudovaním priťažovacej lavice. Druhá etapa, spočívajúca v dobudovaní hlavnej vetvy rebra v celej dĺžke zosuvom a dvoch bočných vetiev, nasledovala až po vybudovaní stabilizačnej priťažovacej lavice.

Celková dĺžka vybudovaných rebier je 46,8 m, pričom dĺžka centrálneho rebra vedeného v pozdĺžnom smere telesom aktívneho zosuvu je 23,7 m, dĺžka ľavej vetvy rebra je 15,5 m, dĺžka pravej vetvy smerujúcej k rodinnému domu je 7,6 m.

Ryha pre rebro sa hĺbila pri dne na šírku 1,0 m, smerom k vrchu sa postupne zväčšovala na cca 2 m, ale v niektorých úsekoch až do šírky 4 m, v závislosti od hĺbky rebra a stability jeho stien. Hĺbka hlavnej vetvy rebra od miesta jeho vyústenia do vodného toku postupne narastala až na cca 4,0 m od povrchu terénu po zosunutí. Smerové vedenie a výškový priebeh dna rebra boli počas výkopových prác geodeticky zameriavané. Generálny sklon dna rebra

dosahuje cca 8 ° (minimálne 5,7 °) smerom k osi vodného toku, čo je dostatočné pre jeho prirodzené odvodnenie, aby nedochádzalo k akumulácii vody v telese svahu.

Pri výkopových prácach bol nad dnom ryhy pre hlavnú vetvu rebra, v úseku od päty svahu približne až do miesta jeho rozvetvenia, viditeľný priebeh aktívnej šmykovej plochy vo výškovej úrovni cca 0,2 – 0,3 m nad dnom výkopu. Šmyková plocha v tejto časti svahu bola viazaná na ostrú hranicu podložných sivých až zelenosivých vysokoplastických ílov (bez úlomkov) s nadložnými vysokoplastickými ílmi v odtieňoch svetlohnedej a hnedej farby, miestami s výraznými hrdzavými šmuhami a zátekmi, ktoré obsahovali vysoký podiel úlomkov laminovaných ílovcov extrémne nízkej pevnosti, s pozorovateľným usmernením po svahu. Od brehu potoka až približne do miesta kde sa hlavné rebro rozvetvuje, boli v horninovom prostredí nad šmykovou plochou, ale aj priamo v miestach šmykovej plochy, pozorovateľné slabé vývery a priesaky podzemnej vody vo výškovej úrovni cca 0,3 až 1,5 m nad dnom rebra.

Po vyhĺbení jednotlivých úsekov rebra bola na dno umiestnená flexibilná perforovaná PVC rúra DN 160 a rebro bolo vyplnené štrkodrvinou frakcie 32 – 63 mm / 32 – 125 mm, obalenou filtračno-separačnou geotextíliou geoNETEX M07, v zmysle požiadaviek projektovej dokumentácie. Drenážno-stabilizačné rebrá boli pri ich povrchu utesnené vrstvou nepriepustnej zeminy za účelom zníženia vplyvu infiltrácie dažďových povrchových vôd na stabilitu svahu.

Obr. 7 Hĺbenie ryhy drenážno-stabilizačného rebra v začiatočnom úseku (27. 5. 2021)
Fig. 7 Dredging of the drainage-stabilization rib in the initial section (27. 5. 2021)

6.3 Stabilizačná oceľová konštrukcia

Horná časť zosunutého svahu v úseku dĺžky 20 m bola spevnená stabilizačnou konštrukciou tvorenou prefabrikovanými oceľovými prvkami. Ide o pružnú, stabilizačnú a súčasne priepustnú konštrukciu. Čelo konštrukcie predstavuje oceľový rám 2,50 × 2,00 m z prvkov HEA100 s ochrannou sieťou. Ochranná sieť je oceľová dvojzákrutová (typ oka 8×10), s PVC ochranou, priemer drôtu 2,7/3,7 mm. Vystužená je oceľovými lanami typu 1×19, 1770 N/mm^2, priemeru 10 mm. V telese násypu je skryté nosné ťahadlo dĺžky 1,50 m z oceľovej rúry priemeru 89 mm s hrúbkou steny 5 mm. Cez styčník je ťahadlo s lanami

spojené s oceľovou kotevnou doskou rozmerov 800 × 800 mm. K aktivácii týchto prvkov dochádza pri ich zasypávaní. Systém je jednoduchý na inštaláciu a je priepustný. Oceľové prvky sú dielenské výrobky vrátane protikoróznej úpravy.

Oceľová konštrukcia sa budovala po úsekoch, aby boli výkopy otvorené čo najkratšie a minimalizovalo sa nebezpečenstvo zosúvania stien výkopu. Pre osadenie prvkov sa po úsekoch dĺžky cca 5 m (pre 2 diely konštrukcie) vyhĺbila stavebná jama s približne vodorovným dnom, na dno ktorej bol navezený a následne vibračnou doskou zhutnený štrkový podsyp, frakcia 0 – 63 mm. Na zhutnený štrkový podsyp sa vedľa seba ukladali a vzájomne spájali jednotlivé prefabrikované diely (obr. 8). Lícové panely sa spájali pomocou lanových svoriek. Pri spájaní a inštalovaní jednotlivých prvkov konštrukcie bol na lokalite prítomný autorský dozor. Konštrukcia bola realizovaná v zmysle technologických predpisov výrobcu a platných TKP a STN. Konštrukcia sa vyplnila štrkovým materiálom a hutnila po vrstvách (v celej zóne konštrukcie bol požadovaný minimálny deformačný modul $E_{def2} \geq 60$ MPa a súčasne $E_{def1} \geq 0{,}45E_{def2}$ MPa). Pre zásyp sa min. do 2/3 konštrukcie v zadnej časti a min. 1/2 výšky konštrukcie v prednej (lícovej) časti použil priepustný drenážny materiál frakcie 32 – 63 mm, vo vrchnej časti pre utesnenie voči vnikaniu povrchových vôd, sa použila vyťažená ílovitá zemina.

Obr. 8 Osadenie a spájanie dielov oceľovej konštrukcie 14. 6. 2021
Fig. 8 Assembly and joining of steel structure components 14. 6. 2021

6.4 Reprofilácia terénu

Reprofilácia terénu bola realizovaná v dvoch etapách. Prvá etapa prebehla na ploche 401,0 m^2, po zrealizovaní priťažovacej lavice a drenážneho rebra, kedy sa svah nad priťažovacou lavicou upravil vysvahovaním a vyspádovaním smerom k recipientu – vodnému toku Čausiansky potok, za účelom urýchlenia odtoku prívalových povrchových vôd mimo sanovanú oblasť Povrch terénu bol zatrávnený. Sklon svahu v centrálnej časti zosuvu po reprofilácii terénu dosahoval cca 12 °.

Druhá etapa reprofilácie bola realizovaná po vybudovaní stabilizačnej oceľovej konštrukcie, kedy bol upravený a rekultivovaný aj dotknutý svah nad vybudovanou stabilizačnou konštrukciou, podobne ako plocha vytvorená stabilizačnou konštrukciou. Rekultivované boli aj všetky ostatné plochy dotknuté stavebnou činnosťou. Zlikvidovaná bola dočasná prístupová komunikácia v dĺžke cca 80 m a povrch spätne upravený a rekultivovaný. Terénne úpravy v tejto fáze, ktoré nezahŕňali plochu dočasnej prístupovej cesty, prebehli na ploche 331,5 m^2.

Finálny stav zosunutého svahu po realizácii všetkých sanačných opatrení je na obr. 9.

Obr. 9 Finálny stav zosuvu po realizácii sanačných prác 18. 6. 2021
Fig. 9 Final state of landslide after remediation works 18. 6. 2021

7. Záver

Sanačné práce na lokalite aktívneho zosuvu v obci Malá Čausa boli zamerané na odstránenie havarijného stavu a záchranu novostavby rodinného domu.

Hlavnými zrealizovanými stabilizačnými prvkami sú priťažovacia lavica, drenážno-stabilizačné rebro a oceľová stabilizačná konštrukcia. Stabilizačný efekt priťažovacej lavice spočíva v zvýšení pasívnych síl zosuvného svahu priťažením akumulačnej časti zosuvu a zabránení bočnej erózie potoka. Drenážno-stabilizačné rebro plní funkciu odvodnenia zosunutého telesa s čiastočným drenážnym vplyvom aj na bezprostredne nadväzujúce vyššie položené územie. Zároveň má stabilizačný efekt, pretože zasahuje až pod aktívnu šmykovú plochu, čím vylepšuje parametre šmykovej pevnosti v centrálnej časti sanovaného zosuvu. Stabilizačná oceľová konštrukcia spevňuje zosunutý svah v hornej časti a umožnila zmiernenie sklonu zosunutého svahu v blízkosti rodinného domu.

Realizáciou záchranných sanačných prác sa výrazne minimalizovalo zosuvné riziko a zvýšila bezpečnosť obyvateľov v lokalite. Existujúci havarijný stav bol odstránený, na základe čoho mohla byť v tejto lokalite odvolaná mimoriadna situácia, ktorá bola vyhlásená dňa 4. 12. 2020.

Zoznam literatúry

Tupý, P., Šimeková, J., Páleník, M., Jasovská, A., Sňahničan, J., 2/2021: Sanácia zosunutého svahu v obci Malá Čausa, lokalita Vítaličnica. Záverečná správa z orientačného inžinierskogeologického prieskumu. ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica, 25 s.

Tupý, P., Šimeková, J., Páleník, M., Jasovská, A., Sňahničan, J., Súľovská, M., Prelovský, B., 7/2021: Sanácia zosunutého svahu v obci Malá Čausa, lokalita Vítaličnica. Záverečná správa zo sanácie geologického prostredia. ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica, 20 s.

Jadroň D., Surový, D., 2012: Malá Čausa - rodinné domy (RD). Záverečná správa z orientačného inžinierskogeologického prieskumu, 11 s.

SANÁCIA MIMORIADNEJ SITUÁCIE NA CESTE II/531 MURÁŇ – MURÁNSKA HUTA

REHABILITATION OF THE EMERGENCY SITUATION ON THE ROAD II/531 MURÁŇ – MURÁNSKA HUTA

Vojtech Lukáč[1], Jozef Sňahničan[2], Branislav Prelovský[2]

[1]HBH PROJEKT s r.o., Kapitulská 313/12, 974 01 Banská Bystrica,
e-mail: (v.lukac@hbhprojekt.sk)

[2]GEOSOUL, s.r.o.,Rusovská cesta 13, 851 01 Bratislava,
e-mail: (info@geosoul.sk)

Abstrakt: Príspevok sa zaoberá sanáciou vzniknutej mimoriadnej situácie. Z dôvodu značného poškodenia komunikácie II/531 extrémnymi prívalovými zrážkami v roku 2020 bolo nutné pristúpiť k jej komplexnej sanácii. Sanačné práce prebiehali v niekoľkých etapách, kde prvou etapou bolo zabezpečenie sprejazdnenia daného úseku do konca roka 2020 a následne v ďalších etapách vybudovanie trvalého riešenia. Z dôvodu krátkeho času bolo potrebné pristúpiť k sanácii v prvej etape suchými sanačnými technológiami dostupnými v reálnom čase. Nosnou časťou sanácie bolo znovuvybudovanie poškodeného telesa komunikácie a systémov odvodnenia. Vzhľadom na to, že svahy telesa boli v niektorých miestach úplne odplavené, zničené a porušené hlbokými ryhami, bolo nutné sanovať svahy až od eróznej bázy potoka smerom ku korune.

Abstract: The article deals with the remediation of the emergency situation. Due to the significant damage to the II / 531 road by extreme torrential rains in 2020, it was necessary to proceed with its comprehensive remediation. The remediation work took place in several stages, where the first stage was to ensure the transit in half-section by the end of 2020 and then in the next stages to build a permanent solution. Due to the lack of time, it was necessary to proceed with the remediation in the first stage with dry remediation technologies available in real time. The main part of the rehabilitation was the rebuilding of the damaged road body and drainage systems. Due to the fact that the slopes of the body were in some places completely washed away, destroyed and broken by deep grooves, it was necessary to rehabilitate the slopes from the erosive base of the stream towards the crown.

Kľúčové slová: zosuv, prívalový dážď, priepust, sanácia, voda, doprava

Key words: landslide, torrential rain, culvert, remediation, water, traffic

1. Úvod

Príspevok sa venuje sanácii poruchy cesty II/531 z leta 2020. Vplyvom extrémnych zrážok zo dňa 28. 6. 2020 došlo k významnému poškodeniu cesty II/531 v úseku medzi Muráňom a Prednou Horou. Cesta ostala úplne neprejazdná z dôvodu poškodenia komunikácie na viacerých miestach; v dvoch miestach išlo až o zosunutie cestného telesa do cca polovice profilu. Cesta bola najvýraznejšie poškodená od pasportného staničenia km 26,200 do km 26,800. Poškodenie cesty spôsobili extrémne prívalové zrážky za veľmi krátky čas, kedy existujúci systém odvodnenia cesty nebol schopný dané množstvo vody previesť. Dochádzalo k nekontrolovateľnému odtoku vody cez teleso cesty a došlo až k masívnemu poškodeniu cesty na dvoch miestach (obr. 1) a značným lokálnym škodám na rôznych miestach medzi Muráňom a Prednou Horou.

Obr. 1 vľavo Najväčšia porucha zosun ½ profilu v úseku cca 150 m,
Obr. 1 vpravo Zosuv cesty v mieste priepustu
Fig. 1 left Largest failure ½ profile in the section approx. 150 m,
Fig. 1 right Road failure at the point of culvert

2. Charakteristiky územia pred sanáciou

Existujúci systém odvodnenia cesty bol nefunkčný, priepusty boli buď zanesené, alebo poškodené tak, že nemohli plniť svoju funkciu. Existujúca dláždená pravostranná priekopa bola odplavená. Pravý jazdný pruh bol na niektorých miestach značne poškodený, temer po celej dĺžke bol podmytý, zvodidlá boli nefunkčné.
Poškodenia zistené obhliadkou:

- existujúca pravostranná spevnená priekopa je poškodená temer v celej dĺžke
- existujúce priepusty a kalové jamy sú zanesené
- svetlosť priepustov je nedostatočná – väčšinou DN 500
- pozdĺžna drenáž vrátane kontrolných šachiet v danom úseku neexistuje
- pravostranné zárezové svahy sú na niektorých miestach zosunuté
- ľavostranné svahy sú na niektorých miestach zosunuté
- po ľavej strane je cesta na niektorých miestach podmytá, vrátane poškodenia krytu a nespevnenej časti krajnice
- po ľavej strane sú na niektorých miestach poškodené zvodidlá

V zmysle § 14 ods. 4 zákona Národnej rady Slovenskej republiky číslo 42/1994 Z. z. o civilnej ochrane obyvateľstva v znení neskorších predpisov bola dňa 3.7.2020 vyhlásená mimoriadna situácia na území okresu Revúca.

3. Geologická preskúmanosť územia

Podrobný inžinierskogeologický prieskum realizovala spoločnosť HES-COMGEO spol. s r.o. s cieľom komplexne posúdiť inžinierskogeologické a hydrogeologické pomery na najviac poškodených úsekoch cesty II/531 medzi obcami Muráň a Muránska Huta. Z výsledkov IG prieskumu vyplýva, že na územiach poškodených úsekoch cesty II/531, ako aj na svahoch pod cestou nebola hladina podzemnej vody až na lokálne prípady zistená. Skúmané územie je budované na povrchu deluviálnymi piesčitými a štrkovitými sedimentmi. Pod vrstvami kvartérnych zemín boli v skúmanom území zachytené horniny paleozoika, zastúpené žulorulami v rôznych štádiách zvetrania. Horninové zloženie skúmaného územia bolo identifikované prostredníctvom vrtov, penetračných skúšok a kopaných sond. Uvedené geologické a geomorfologické podmienky spôsobujú, že zrážkové vody dopadajúce na južné až juhovýchodné svahy nad cestou, infiltrujú do podložia a systémom puklín v skalnom masíve stekajú do hlbších polôh, resp. vo forme povrchového, resp. pripovrchového odtoku stekajú do nižšie položených častí územia. Z uvedeného vyplýva, že podzemné vody nemajú možnosť na väčšine skúmaného územia vytvárať súvislý horizont podzemnej vody. Aj vo vrtoch a penetračných sondách, kde bola podzemná voda zistená, mala charakter negatívne napätej vody (po 1 hod. boli vrty bez vody). Po 1 hod. od dovŕtania geologických diel v nich nebola hladina podzemnej vody zistená.

4. Základné charakteristiky sanačných opatrení

Sanačné práce prebiehali v niekoľkých etapách, kde prvou etapou bolo zabezpečenie sprejazdnenia daného úseku do konca roka 2020 a následne v ďalších etapách vybudovanie trvalého riešenia. Z dôvodu veľmi krátkeho času bolo potrebné pristúpiť k sanácii okamžite, v prvej etape suchými sanačnými technológiami dostupnými v reálnom čase. Nosnou časťou sanácie bolo znovuvybudovanie poškodeného telesa komunikácie a systémov odvodnenia. Vzhľadom na to, že svahy telesa boli v niektorých miestach úplne odplavené, zničené a porušené hlbokými ryhami, bolo nutné sanovať svahy až od eróznej bázy potoka smerom ku korune.

S ohľadom na rozsah územia, hustotu zalesnenia a členitosť terénu, zosuvom poškodeného úseku cesty II/531 Muráň – Muránska Huta, bolo nutné vytvoriť precízny digitálny model terénu. Ideálnym nástrojom na dosiahnutie daného cieľa bolo letecké laserové skenovanie. Celková veľkosť územia zmapovaného pomocou leteckého laserového skenovania bola cca 310 ha. Letecké laserové skenovanie bolo realizované dňa 25. 8. 2020, s tým, že bolo vykonaných 14 preletov v určených rozostupoch nad skúmanou lokalitou. Výsledky z terestického laserového skenovania boli spracované tak, že boli priamo použiteľné v CAD softvéroch. Na základe mračna bodov bol vytvorený geodetický výškopis a polohopis (2D a 3D). Digitálny model terénu predstavuje najlepší možný podklad pre hĺbkovú analýzu územia z hľadiska potenciálnych rizík vyplývajúcich najmä z identifikácie predisponovaných ciest pri zrážkach, či existenciu možných skalných zosuvov.

Orientačná hydrologická analýza prúdenia povrchovej vody potvrdila vysoké potenciálne zaťaženie priepustu povrchovej vody v oblasti strmej zákruty (km 26,800), kde počas poslednej povodňovej udalosti z júla 2020 došlo k najväčším škodám. Daný priepust popod cestou II/531 sa nachádzal v pomerne úzkom terénnom zárezе, do ktorého sa kumulovali povrchové vody zo zbernej oblasti o rozlohe cca 52 ha.

Projektová dokumentácia bola spracovaná na úrovni dokumentácie na realizáciu stavby. Za účelom minimalizácie identifikovaných rizík počas výstavby sa operatívne priebežne vyhodnocovali skutočné podmienky na stavbe a tieto sa po odsúhlasení zapracovávali.

Navrhované riešenia:

- posúdenie kapacity existuj. priepustov – ich rekonštrukcia – min. DN 600 (TKP č.3 Priepusty), s dôrazom na riešenie priepustu v km 0,505 53 – na základe hydrologickej analýzy
- návrh umiestenia nových priepustov s kalovými jamami
- posúdenie kapacity pravostrannej priekopy
- spôsob úpravy spevnenej priekopy – vhodný typ prefabrikátu, opatrenia na spomalenie rýchlosti vody, prepadové šachty
- realizácia pozdĺžnej drenáže vrátane kontrolných šachiet
- realizácia štrbinových žľabov v mieste zjazdov
- realizácia priečnych žľabov pri napojení zjazdov na vozovku
- realizácia IGHP / geotechnický prieskum
- posúdenie stability svahu
- návrh riešenia pre zemné teleso v násype a v záreze

Obr. 2 Výstavba v zimnom období
Fig. 2 Construction works in winter

Sanácia bola rozdelená do týchto hlavných objektov stavby:

101 Cesta II/531
102 Obchádzková cesta
103 Identifikácia poškodení cesty II/531 v km 24,400 – 29,900
301 Odvodnenie cesty II/531 a vodozádržné opatrenia

Dotknuté územie, kde bola naplánovaná sanácia, sa nachádza v Národnom parku Muránska planina, ktoré je zároveň aj súčasťou sústavy Natura 2000 ako SKUEV0225 Muránska planina a CHVU017 Muránska planina – Stolica. Na území NP Muránska planina platí 3. stupeň ochrany podľa zákona O ochrane prírody a krajiny č. (§14). Realizáciu stavebných prác bolo potrebné koordinovať so Správou NP Muránska planina.

Vzhľadom na termín ukončenia stavebných prác bolo nevyhnutné nasadiť dostatočné počty strojov a pracovníkov a súčasne zvoliť takú postupnosť prác a také technológie, aby boli práce rozvinuté v celom úseku stavby.

4.1 Sanačné opatrenia na objekte 101 Cesta II/531

Objekt 101 bol prioritným objektom v prvej etape sanácie (dočasné sprejazdnenie cesty II/531 v jednom jazdnom pruhu). Cieľom bolo zrealizovať konštrukcie čiastočne, a to tak, aby bol možný prejazd osobných vozidiel a autobusov v jednom jazdnom pruhu. Boli odstránené popadané stromy a kroviny brániace realizácii sanácie, odstránený deponovaný materiál, odstránené poškodené konštrukčné vrstvy vozovky a zvodidlá, zrealizované prečistenie a rekonštrukcia systému odvodnenia vrátane priepustov. Riešila sa sanácia v miestach najväčších poškodení.

Obr. 3 Podmyté asfaltové vrstvy
Fig. 3 Underwashed tar layers

Poškodenie-zosuv cesty v mieste zlomeného priepustu:

Sanácia bola realizovaná od päty svahu k jeho korune. Najskôr sa vybudovali pracovné prístupové komunikácie. V najnižšom mieste existujúcej terénnej depresie vznikla vplyvom prívalových vôd hlboká erózna ryha. Táto ryha bola v prvom kroku vyplnená lomovým kamenivom až do úrovne existujúceho priľahlého terénu. Takto vyplnená ryha bude slúžiť ako odvodňovací drén. Následne bola realizovaná priťažovacia stabilizačná lavica z lomového kameňa v akumulačnej oblasti zosuvu, v päte svahu. Výmena rozbriednutého zosunutého materiálu za lomový kameň s kombinovanou frakciou 63 – 125 mm až 16 – 63 mm sa vykonávala po sekciách – záberoch cca 4-5 m, t.j. vyťažený materiál zosuvu bol okamžite nahradený lomovým kameňom tak, aby nedošlo k reaktivácii zosuvu. Zazubenie na previazanie priťažovacej lavice s existujúcim svahom sa realizovalo postupne s narastaním výšky priťažovacej lavice i novobudovaného zemného telesa v násype. Po realizácii nosnej časti zemného telesa sa realizovala ochranná lícová protierózna konštrukcia z 3D panelov vyplnená

kamenivom frakcie 32 – 63 mm. V korune obnoveného cestného telesa bol zrealizovaný nový rámový priepust, vzhľadom na rozsah poškodenia (deštrukciu) pôvodného priepust.

Poškodenie-zosun ½ profilu cesty:

Navrhované technické riešenie v mieste najväčšieho poškodenia, ktoré bolo kritické pre sprejazdnenie spočívalo vo vybudovaní násypu systémom vystuženej horninovej konštrukcie (VHK) so strateným lícom, ktorá umožnila relatívne rýchly postup prác. Navrhnuté riešenie umožňovalo postup prác i v zimnom období. Sanácia násypového telesa formou VHK bola realizovaná od päty zosunutého svahu, so založením na skalnom podklade etapovitou výstavbou. VHK bola realizovaná po vrstvách výšky 0,60 m, s postupným vystužovaním a budovaním zemného telesa v násype. Teleso VHK bolo previazané s pôvodným telesom násypu formou zazubenia. Zazubenie muselo zasahovať až do nepoškodenej časti pôvodného násypu. Degradované a znehodnotené časti násypového materiálu boli odstránené. Bola vybudovaná ochrana päty VHK. Po realizácii nosnej časti zemného telesa bola realizovaná ochranná lícová protierózna konštrukcia (KRISMER systém). Protierózne 3D panely boli na povrch VHK prichytené pomocou distribučných tyčí a zarážaných T-kotiev. Plnenie lícovej protieróznej konštrukcie bolo realizované kamenivom frakcie 32 – 63 mm, smerom zhora nadol. Po zrealizovaní podrobného IGHP sa konštrukcia verifikovala a navrhla do finálneho trvalého stavu druhej etapy – trvalého sprejazdnenia cesty II/531 v dvoch jazdných pruhoch.

Početné úseky boli charakteristické podmytím asfaltových vrstiev ľavej strany vozovky a hlbokými eróznymi ryhami, ktoré degradovali a rozrušili pôvodný svah tvoriaci cestné teleso. Vplyvom hlbokých eróznych rýh boli doslova vyplavené zarazené stĺpiky záchytných bezpečnostných zariadení. Zničené, porušené svahy bolo nevyhnutne nutné sanovať od bázy potoka smerom ku korune.

Obr. 4 Vystužená horninová konštrukcia s protieróznym lícovým prvkom
Fig. 4 Reinforced soil structure with erosion facing elements

Súčasťou bola tiež rekonštrukcia existujúceho nevyhovujúceho kamenného klenbového priepustu v prudkej ľavotočivej zákrute. V cestnej databanke bol zaradený do stavu: nefunkčný. Predmetný priepust bol jedným z pôvodcov mimoriadnej situácie. Po upchatí priepustu došlo k nekontrolovanému toku prívalových vôd po povrchu cesty II/531 a priľahlom teréne.

Pôvodný klenbový priepust bol asanovaný a bola zrealizovaná nová oceľová presypaná konštrukcia za vylúčenia dopravy na danom úseku.

4.2 102 Obchádzková cesta

Organizácia dopravy počas realizácie bola usmernená prenosným dopravným značením. Doprava bola vedená po existujúcej lesnej ceste – obchádzkovej trase pre osobné vozidlá s povolením, nákladná doprava bola vedená cez Revúcu alebo Brezno. Na obchádzkovej trase sa doplnili záchytné bezpečnostné zariadenia – zvodidlá, vyčistil sa systém pozdĺžneho a priečneho odvodnenia (priekopy, priepusty). Opravil sa povrch cesty v nevyhnutnom rozsahu a spevnili sa existujúce výhybne.

4.3 Sanačné opatrenia na objekte 103 Identifikácia poškodení cesty II/531 v km 24,400 – 29,900

Sanácia pomocou vystuženej horninovej konštrukcie

Sanácia päty poškodeného násypového telesa formou vystuženej horninová konštrukcie (VHK) s poddajným lícom. Konštrukcia s premenlivou výškou je navrhnutá ako jednostupňová, so sklonom líca cca 60 stupňov. VHK je tvorená horizontálnym vystužením telesa násypu, lícovou protieróznou konštrukciou a sypaninou. Pohľadová lícová časť je kamenná. Sanácia násypového telesa formou VHK bola realizovaná od päty zosunutého svahu, so založením na skalnom podklade etapovitou výstavbou. VHK bola realizovaná po vrstvách výšky 0,60 m, s postupným vystužovaním a budovaním zemného telesa v násype. Po realizácii nosnej časti zemného telesa sa realizovala ochranná lícová protierózna konštrukcia z 3D panelov hrúbky 80 mm.

Sanácia pomocou protieróznych panelov

Sanácia poškodených svahov cestného telesa v záreze formou protieróznej ochrannej konštrukcie z 3D panelov so systémovým T-profilovými kotvami.

Obr. 5 Gabión kotvený mechanickými kotvami
Fig. 5 Gabion anchored with mechanical anchors

Sanácia formou kotveného gabiónu

Na zabezpečenie cestného telesa v násype v strmom svahu bola navrhnutá kotvená konštrukcia gabiónového múra výšky 3,0m s nadnásypom. Gabiónové koše šírky 1,0 m boli kotvené pomocou mechanických zarážaných kotiev cez roznášaciu platňu. V zmysle výsledkov IG prieskumu tvoria geologický profil kvartérne zeminy, ktoré siahajú do hĺbky 6,1 m. Reprezentujú ich antropogénne sedimenty a deluviálne piesčité zeminy. Pod vozovkou sa v danom profile nachádzajú prevažne piesčité zeminy, a to kypré až stredne uľahlé piesky ílovité, triedy S5. Od hĺbky 6,1 m p. t. boli vrtom V-22 zistené stredne až silne zvetrané žuloruly, triedy R5/R4. Piesčité a ílovité zeminy sú vhodné na aplikáciu mechanických zarážaných kotiev.

Sanácia lomovým kameňom

Sanácia plytkých eróznych rýh v korune násypového telesa bola realizovaná lomovým kameňom. Samotná sanácia pozostáva z odstránenia degradovaného zosunutého pôvodného materiálu a jeho nahradením za lomový kameň s vyklinovaním medzier povrchu frakciou 0-90 mm.

4.4 Sanačné opatrenia na objekte 301 Odvodnenie cesty II/531 a vodozádržné opatrenia

Prietok vody v potokoch v blízkosti cesty II/531 je významný hlavne v období dažďov a prívalových dažďov, kedy so sebou unáša značné množstvo splavenín. Nakoľko sa potoky nachádzajú v blízkosti cesty II/531, je potrebné zabezpečiť vhodnými opatreniami na potoku bezpečnosť a stabilitu komunikácie pri súčasnom bezpečnom prevedení prietoku Q100 potoka.

Na spomalenie väčších prietokov, ako aj na zachytenie hrubších splavenín, boli navrhnuté v koryte i v lese prehrádzky. Konštrukčne boli riešené ako betónová konštrukcia s kapsami na oboch brehoch, do ktorých sa vložila dubová guľatina.

Objekt taktiež riešil realizáciu systému odvodnenia, čo zahŕňa pozdĺžnu drenáž s kontrolnými šachtami, spevnenú priekopu, kalové jamy, atď.

Obr. 6 Systém odvodnenia
Fig. 6 Drainage system

Obr. 7 Rámový priepust (vľavo pôvodný, vpravo nový)
Fig. 7 Frame culvert (original on left, new on the right side)

V rámci stavby bol v mieste križovania potoka s cestou II/531 vybudovaný nový rámový priepust v km 26.25845 (SO 101-01). Úprava koryta potoka je navrhnutá od kalovej jamy navrhovaného rámového priepustu smerom proti prúdu na dĺžke 34 m. Úprava spočíva v rozšírení a vytvarovaní prirodzeného koryta do lichobežníkového tvaru so šírkou v dne 1,0 m a sklonom svahov 1:1. Jedná sa o jednoduchú úpravu existujúceho koryta v rastlom teréne v lesnom prostredí.

Na spomalenie väčších prietokov, ako aj na zachytenie väčších splavením, bola navrhnutá v koryte prehrádzka. Konštrukčne bola riešená ako betónová konštrukcia s kapsami na oboch brehoch, do ktorých sa vložila dubová guľatina. Prehrádzka bola vybudovaná i na Hiencovskom potoku a taktiež na bezmennom potoku v km 26,72408.

Obr. 8 Prehrádzka – vodozádržné opatrenia
Fig. 8 Water retention measures

5. Záver

Príspevok sa venuje popisu sanácie mimoriadnej situácie na ceste I/531. Môžeme konštatovať, že vplyvom zmeny klímy dochádza k intenzívnym zrážkam, kde vo veľmi krátkom čase nie je horninové prostredie schopné absorbovať také množstvo vody a vzniká obrovský nápor na systém odvodnenia a konštrukcie cestného telesa, ktoré neboli na takéto pomery dimenzované. Dnešné sanačné metódy nám umožňujú relatívne rýchlu opravu a zosilnenie konštrukcií cestného telesa, avšak prioritne je žiadúci vyšší dôraz na kvalitnú údržbu systémov odvodnenia, ktorej výsledkom bude ušetrenie vysokých nákladov na sanácie spôsobené vznikom svahových deformácií a porúch líniových stavieb. Veľmi dôležitým faktorom na zamedzenie, resp. opakovanie sa vzniknutej havárie je dôkladná a pravidelná údržba systémov odvodnenia. Kľúčovým faktorom pre predmetnú úspešnú realizáciu diela bola úzka spolupráca investora, projektanta a zhotoviteľa. Generálnemu projektantovi sa podarilo vo veľmi krátkom čase zostaviť spracovateľský tím s potrebnými skúsenosťami, ktorý pozostával zo špecialistov na geotechniku, geodéziu, projektantov mostných objektov, vodozádržných opatrení. Zameranie predmetného územia, prieskumné práce, zhotovenie projektovej dokumentácie a realizáciu oboch etáp sa podarilo zrealizovať v období 08/2020-04/2022. V jednom jazdnom profile bola cesta sprejazdnená od 18. 12. 2020, čo je 168 dní od vyhlásenia mimoriadnej situácie 3. 7. 2020 a 63 dní od začatia stavebných prác.

Zoznam literatúry

HES-COMGEO spol. s r.o., 2020: Muráň-sanácia cesty č.531 v úseku Muráň-Muránska Huta, Podrobný inžinierskogeologický prieskum

HBH PROJEKT spol. s r.o., 2020: Projektová dokumentácia „Sanácia mimoriadnej situácie na ceste II/531 Muráň-Muránska Huta

SANÁCIA HRADNÉHO BRALA STREČNO

REHABILITATION OF STREČNO CASTLE ROCK CLIFF

Branislav Prelovský[1], Katarína Házyová[2], Vlasta Jánová[3]

[1]GEOSOUL,s.r.o.,Rusovská cesta 13, 851 01 Bratislava, e-mail: info@geosoul.sk
[2]Jašíkova 11, 821 03 Bratislava, e-mail: katka.hazy@gmail.com
[3]Bajzova 6, 821 08 Bratislava, e-mail: e-mail: vlasta0811@gmail.com

Abstrakt: Príspevok popisuje priebeh sanácie skalného brala Strečno nad významnou cestnou komunikáciou I/18. Sanačné práce spočívali v zaistení nestabilných skalných blokov kotvením, v injektovaní blokov, v sanácii dutín a trhlín výstuhami a zaistení kritických blokov špeciálnymi oceľovými sieťami. Sanácia previsu nad plánovanou galériou pozostávala zo stavby dvoch železobetónových oporných múrov v kombinácii s predpätými lanovými kotvami. Príspevok sa venuje tiež spôsobu riešenia havarijnej situácie súvisiacej s kritickým skalným blokom, ktorého zrútenie by významne ohrozovalo cestnú premávku a životy ľudí.

Abstract: The paper describes the course of remediation of the Strečno rock cliff above the important road I/18. Rehabilitation work consisted of securing unstable rock blocks by anchoring, grouting blocks, rehabilitating cavities and cracks with reinforcements and securing critical blocks with special steel nets. Rehabilitation of the overhang over the planned gallery consisted of the construction of two reinforced concrete retaining walls in combination with prestressed rope anchors. The paper also deals with the way of solving the emergency situation related to the critical rock block, the collapse of which would significantly endanger road traffic and people's lives.

Kľúčové slová: sanácia, skalné bralo, nestabilné skalné bloky, oporné múry, lanové kotvy, ohrozená doprava

Key words: remediation, rock cliff, unstable rock blocks, retaining walls, rope anchors, endangered traffic

1. Úvod do problematiky sanácie skalného brala Strečno

Problematikou svahových deformácií typu rútenia z priestorov hradného brala Strečno a ich vplyvu na bezpečnosť cestnej premávky sa zaoberajú odborníci už od 70-tych rokov minulého storočia. Komunikácia I/18 Strečno – Dubná Skala je vedená v úzkom koridore medzi korytom rieky Váh a masívom Malej Fatry. V niektorých úsekoch, kde najkritickejším je úsek hradného brala, je komunikácia vedená popri skalnej stene vysokej vyše 100 m v jej tesnej blízkosti. Skalný masív je tektonicky porušený, skrasovatený, podlieha intenzívnemu zvetrávaniu a dochádza v ňom k uvoľňovaniu skalných úlomkov až mohutných blokov na komunikáciu.

V danom úseku bolo v minulosti realizovaných niekoľko etáp sanácie. Najrozsiahlejšie geologické práce boli realizované v roku 1981 v rámci geologickej úlohy

„Inžinierskogeologické posúdenie hradného masívu Strečno – expertíza“ (Malgot a kol., 1981). V roku 1984 bola na základe výsledkov uvedenej úlohy realizovaná sanácia skalného masívu. Stabilita skalnej steny bola zabezpečovaná hlavne mikropilótami a injektážou. Skalné previsy boli dočasne zabezpečené oceľovými lanami a rozvoľnené časti masívu boli očistené.

Druhá, relatívne nedávna sanácia, bola realizovaná v rokoch 2008 – 2009 a bola iniciovaná smrteľným úrazom po dopade skalného bloku na motorové vozidlo. V rámci tejto sanácie boli realizované opatrenia nielen na skalnom brale hradu, ale aj v celej dĺžke úseku cesty Strečno – Dubná Skala.

Tretia sanácia, ktorou sa zaoberá tento príspevok, realizovaná v rokoch 2016 – 2017, bola iniciovaná výsledkami inžinierskogeologického prieskumu a geotechnického monitoringu.

Od roku 1996 vykonáva Štátny geologický ústav D. Štúra v rámci geologickej úlohy „Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory – Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi“ monitorovanie rozvoľňovania skalného bloku na hradnom brale Strečno. V aktívnej poruche skalného masívu je trvalo zabudovaný opticko-mechanický dilatometer TM-71, ktorý zaznamenáva hodnoty posunov v horizontálnej aj vertikálnej rovine. Na základe týchto dlhodobých monitorovacích prác sa v roku 2014 zistilo, že hrozí odtrhnutie masívneho skalného bloku na cestnú komunikáciu (Petro a kol., 2015).

V roku 2015 zabezpečilo MŽP SR realizáciu inžinierskogeologického prieskumu, ktorého cieľom bolo podrobné geologické mapovanie, detailné skúmanie drobnotektonických prvkov horninového masívu, vyčlenenie kritických úsekov skalného brala a boli navrhnuté sanačné opatrenia (Novotný a kol., 2015).

Vzhľadom na fakt, že komunikácia I/18 je jednou z najvyťaženejších dopravných tepien na Slovensku s intenzitou takmer 27 tis. vozidiel denne, bolo okrem technickej stránky sanácie nevyhnutné zabezpečiť sanačné práce tak, aby bolo obmedzenie dopravy čo najmenšie.

2. Realizácia sanácie hradného brala

Sanácia hradného brala Strečno bola realizovaná v rámci geologickej úlohy, ktorú zabezpečovalo MŽP SR. Presný rozsah geologických prác bol definovaný špecifikáciou predmetu zákazky v rámci verejného obstarávania. Práce boli rozdelené na sanáciu skalného brala (okamžité protihavarijné opatrenia a geologické sanačné práce na skalnom brale) a stavebné práce na sanácii previsu nad plánovanou galériou, ktorých súčasťou bol aj doplnkový inžinierskogeologický prieskum potrebný pre založenie podporných konštrukcií. Rozdelenie geologickej úlohy je zobrazené na obr. 1.

Obr. 1 Rozdelenie geologickej úlohy
Fig. 1 Framework of geological task

Termín začatia prác bol v októbri 2016, termín ukončenia geologickej úlohy bol októbri 2017. Počiatočné práce boli realizované počas 15 úplných uzávierok dopravy na štátnej ceste I/18 pod hradným bralom, a to vždy od soboty 8,00 hod. do nedele 16,00 hod. Uzávera dopravy si vyžiadala inštaláciu viac ako 500 dočasných dopravných značiek. Práce, ktoré neohrozovali bezpečnosť premávky, sa vykonávali v rámci možností aj mimo úplnej uzávierky.

Následné práce na sanácii skalného brala (kotvenie, injektovanie, zaistenie striekaným betónom, betónové plomby, sieťovanie) sa realizovali pod ochranou monitorovacích zariadení a plota dočasného zaistenia vrátane existujúcich ochranných konštrukcií bez obmedzenia dopravy. Výnimku tvorí sanácia previsu nad plánovanou galériou, ktorá sa realizovala v stavebnom režime počas čiastočnej uzávierky komunikácie (prevádzka za zníženej rýchlosti v dvoch zúžených pruhoch).

2.1 Okamžité protihavarijné opatrenia

Vzhľadom na stav skalného brala bolo potrebné realizovať niektoré práce bezodkladne. Jednalo sa o súbor okamžitých protihavarijných opatrení, ktoré zahŕňali:

- prípravu kotevných bodov,
- odstránenie náletovej vegetácie,
- inštaláciu sietí na usmernenie pádu úlomkov hornín,
- očistenie skalných stien od zvetralín,
- odťaženie nestabilných úlomkov hornín,
- výstavbu plota dočasného zaistenia,
- vybudovanie monitorovacej siete.

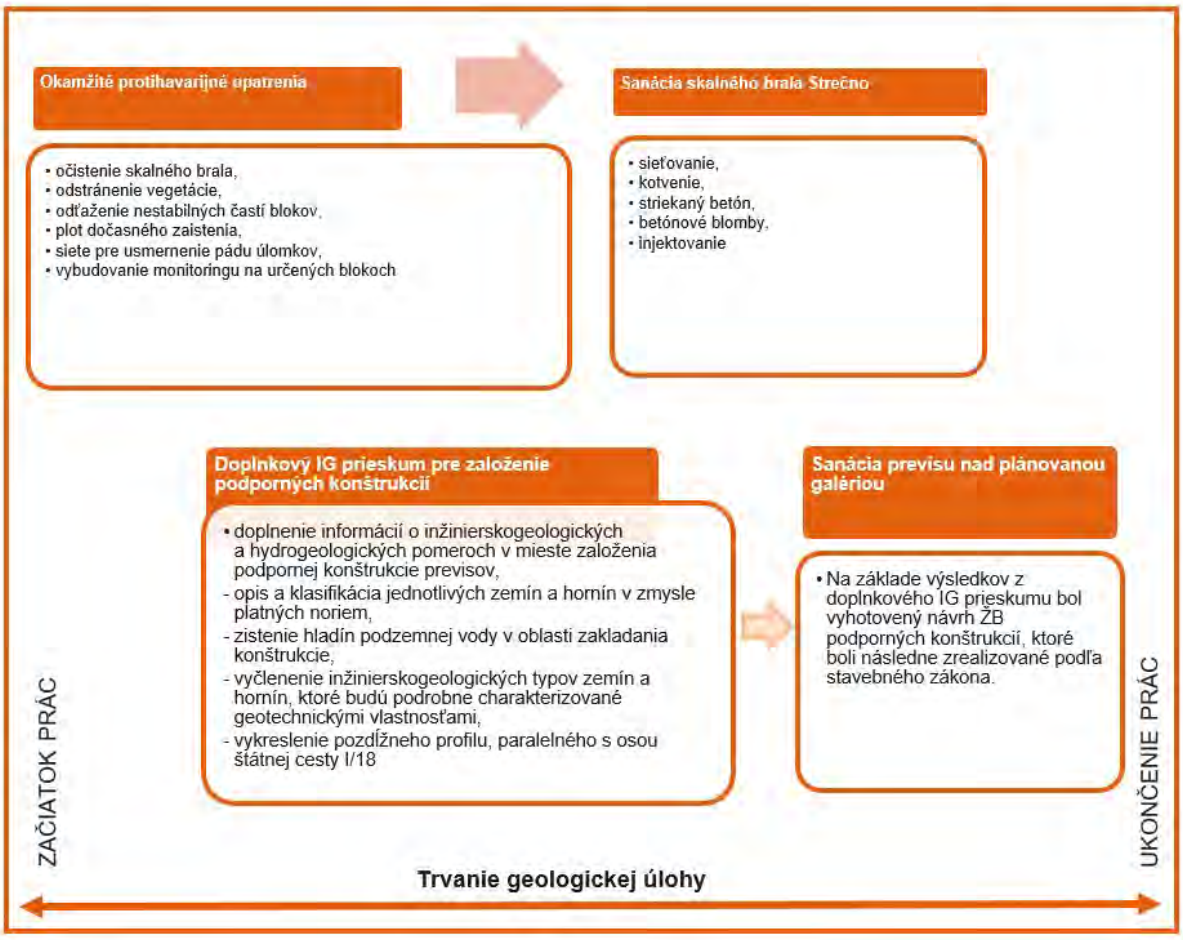
Všetky vyššie uvedené práce boli realizované skupinami horolezcov počas zimného obdobia v značne sťažených poveternostných podmienkach (obr. 2).

Obr. 2 Sanačné práce vykonávané horolezeckým spôsobom (foto: J. Šimeková)
Fig. 2 Rehabilitation work performed in a climbing manner (photo: J. Šimeková)

2.2 Sanácia kritických častí skalného brala

Následne po schválení projektu geologickej úlohy sa pristúpilo k samotnej sanácii určených častí skalného brala, konkrétne k sanácii kritických blokov I až IV a k sanácii previsu nad štátnou cestou (plánovanou galériou). Jednotlivé práce sú znázornené na obr. 3.

Sanačné práce spočívali v zaistení nestabilných častí skalných blokov kotvením (kotvenie častí blokov I a III), injektovaním blokov II a III, sanácii dutín a trhlín výstuhami na blokoch I a IV, sanácii trhlín medzi blokmi I a II. Všetky kritické bloky boli zaistené špeciálnymi oceľovými sieťami. Najnebezpečnejšie poruchové zóny a zvetrané časti boli sanované aplikáciou striekaných betónov. Aj tieto práce boli vykonávané v náročných podmienkach horolezeckým spôsobom. Počas celého priebehu sanačných prác bolo zabezpečené monitorovanie najohrozenejších častí skalného brala.



Obr. 3 Detailné rozdelenie geologickej úlohy
Fig. 3 Framework of geological task in details

2.3 Sanácia previsu nad plánovanou galériou

Sanácia skalného previsu bola navrhnutá ako kombinácia kotvených oporných múrov založených na mikropilótovom základe a horninových lanových kotiev (obr. 4). Oporný múr "A" bol realizovaný v sklone pohľadovej časti 12:1 s maximálnou výškou v pohľade cca 25,9 m. Šírka základu bola 6,5 m. Oporný múr "B" bol postavený v sklone pohľadovej časti 3:1 s maximálnou výškou v pohľade cca 15,8 m so šírkou základu 5 m. Na rubovej strane

oboch múrov boli vyhotovené klince v rasti 1,5 x 1,5 m za účelom stabilizácie debnenia počas betonáže a zároveň pre "spriahnutie" drieku múru so skalným masívom. Dĺžka klinca v hornine bola minimálne 4 m. Oba múry sú kotvené v hornej časti trvalými lanovými kotvami. Pre dlhodobé meranie sily v kotvách boli na všetkých kotvách nainštalované magnetoelastické dynamometre Dynamag. Založenie múrov bolo realizované ako hĺbkové na mikropilótovom základe, s dĺžkou výstuže mikropilóty 9 m a dĺžkou koreňa 8 m (Fekeč a kol., 2017).

Tieto práce sa realizovali v stavebnom režime na základe projektu vypracovaného v súlade so zákonom č. 50/1976 Zb. o územnom plánovaní a stavebnom poriadku v znení neskorších predpisov (stavebný zákon).

Obr. 4 Budovanie oporných múrov
Fig. 4 Construction of retaining walls

3. Vznik havarijnej situácie počas sanácie brala

Počas realizácie sanačných opatrení sa začiatkom júla 2017 vyskytla nepredvídateľná situácia, keď z nesanovanej časti skalného brala vypadol blok horniny na štátnu cestu. Zhotoviteľ okamžite oznámil vzniknutú situáciu a bol požiadaný o vykonanie prehliadky a odborného posudku. Počas prehliadky bol vo výške cca 60 m nad úrovňou komunikácie identifikovaný nestabilný blok a ďalšie nestabilné časti v jeho okolí s hmotnosťou cca 120 t, ktoré bolo nevyhnutné odstrániť.

Situácia bola vyhodnotená ako vysoko riziková, na základe čoho bola obcou Strečno vyhlásená mimoriadna situácia. Komunikácia I/18 bola pre dopravu úplne uzavretá od 16. 7. do 29. 7. 2017. Na minimalizáciu poškodenia komunikácie bolo navrhnuté vytvorenie „ochranného vankúša" z dostatočne hrubej ochrannej vrstvy zeminy (cca 1 m). Následne bol kritický rozvoľnený skalný blok odstránený (obr. 5) pomocou ručného náradia, hydraulických klinov a zdvíhacích vankúšov. Kontrolovaným spôsobom uvoľnený blok sa počas pádu rozpadol na menšie kusy, ktoré dopadli do vymedzeného akumulačného priestoru. Po očistení skalného brala a odstránení ochrannej vrstvy zeminy z komunikácie mohla byť štátna cesta opäť sprejazdnená.

Obr. 5 Uvoľnený skalný blok a jeho odstraňovanie (Bohátka, 2017)
Fig. 5 Loose rock block and its removal (Bohátka, 2017)

4. Vplyv dopravných obmedzení na priebeh sanácie

Realizácia vyššie uvedených okamžitých protihavarijných opatrení, sanačných prác a záchranných prác počas mimoriadnej situácie by nebola možná bez obmedzenia dopravy pod skalným bralom a bez spolupráce všetkých zainteresovaných zložiek. Geologické práce prebiehali v štyroch rozdielnych režimoch obmedzenia dopravy:

- priebeh prác bez dopravného obmedzenia,
- úplné uzávierky cesty I/18 počas víkendov – od 08,00 hod. v sobotu do 16,00 hod. v nedeľu,
- úplná uzávierka cesty I/18 počas mimoriadnej situácie na 14 dní,
- obmedzenia v doprave – zúženie jazdných pruhov na 2,8 m so zabezpečením obojsmernej premávky a obmedzením rýchlosti na 30 km/hod.

4.1. Priebeh prác bez dopravného obmedzenia

Počas tohto režimu sa vykonávali práce na skalnej stene, ktoré boli posudzované ako menej rizikové pre dopravu na komunikácii a boli vykonávané vďaka ochrane účelovo vybudovaných záchytných dočasných plotov. Pre motoristov v podstate bezproblémový režim, pre zhotoviteľa tento režim predstavuje maximálnu opatrnosť pri prácach, spomalenie prác a plánovanie len takých prác, ktoré minimalizujú riziká. Počas vykonávania týchto prác sa však vyskytovali situácie, kde sa krátkodobo komunikácia uzatvárala pracovníkmi zhotoviteľa, tzv. hliadkou. Je však nevyhnutné zdôrazniť, že každá práca vykonávaná vo výškach na tak

exponovanej lokalite ako je Strečno, je riziková a aj napriek zabezpečeniu cesty dočasnými ochrannými plotmi sa nedá na 100 % vylúčiť riziko pádu skalných úlomkov.

4.2. Úplné uzávierky cesta počas víkendov

Zhotoviteľ mohol v tomto režime začať práce od 8,00 hod. v sobotu, t.j. od cca 6,00 hod. museli začať prípravné práce tak, aby sa v skutočnosti mohlo s čo najvyšším nasadením začať ihneď po uzávierke pracovať. Práce prebiehali až do zotmenia, krátke dni sú veľkou nevýhodou počas zimného obdobia. Pôvodne zhotoviteľ plánoval pracovať aj počas noci, ale vzhľadom na rizikovosť prác po niekoľkých pokusoch od tohto variantu upustil. Ukončenie prác musel plánovať tak, aby v nedeľu o 16,00 hod. mohla byť bezpečne spustená doprava, t.j. postupné ukončovanie niektorých procesov muselo byť už niekoľko hodín pred 16,00 hod. a cesta musela byť vyčistená od napadaných úlomkov a vegetácie. Počas uzávierky musel byť umožnený prejazd vozidiel záchranných zložiek, čo znamenalo nepravidelné prerušovanie prác na skalnom brale a značnú nepohodu horolezcov. Všetky takéto situácie boli realizované na základe schválenej schémy odsúhlasenej na rokovaniach s OKR OÚ Žilina.

Úplná uzávierka je pre plánovanie a realizáciu prác najlepším riešením, no úplná uzávierka len počas víkendov má množstvo negatívnych stránok z hľadiska efektivity výkonov. Krátka uzávierka vyžaduje veľmi dobré plánovanie prác a zdrojov. V tak náročnom teréne, ako je zvislá skalná stena, každá náprava poruchy, chýbajúceho materiálu a pod. trvá desiatky minút až hodiny.

Z pohľadu zabezpečenia bezpečnosti a plynulosti cestnej premávky, vzhľadom na vysokú zaťaženosť cesty v pracovných dňoch a v nedeľu v poobedňajších hodinách, čas uzávierok bol stanovený v maximálne únosnom rozsahu. Aj napriek informovaniu motoristickej verejnosti masovo-komunikačnými prostriedkami, zabezpečeniu priamej informovanosti väčších dopravných a výrobných spoločností v Slovenskej republike a aj v zahraničí Okresným úradom v Žiline a nepretržitému dohľadu nad bezpečnosťou a plynulosťou cestnej premávky zo strany Policajného zboru, sa negatívny dopad uzávierok na účastníkov cestnej premávky nepodarilo eliminovať na únosnú mieru, a to predovšetkým z dôvodu neexistencie adekvátnej obchádzkovej trasy.

4.3. Režim dlhodobej úplnej uzávierky cesty

K takejto (predtým nepredstaviteľnej a neschváliteľnej) uzávierke došlo pri realizácii záchranných prác počas vyhlásenej mimoriadnej situácie. Uzávierka trvala nepretržite 14 dní, kým nebol odstránený kritický skalný blok, ktorého pád ohrozoval životy ľudí.

Pre zhotoviteľa je tento režim ideálny pre kontinuitu prác a plánovanie. Dlhodobá uzávierka z dôvodu havarijnej situácie poukázala nielen na strategickú dôležitosť tohto úseku cesty v rámci Slovenskej republiky, ale aj neexistenciu adekvátneho riešenia dopravnej situácie v prípade akejkoľvek mimoriadnej situácie na ceste I/18 Strečno – Dubná Skala. Plnohodnotná obchádzková trasa 23 km dlhého úseku je v dĺžke 291 km. Dopad tejto uzávierky na užívateľov infraštruktúry, aj napriek vykonaným opatreniam, krajský dopravný inšpektorát hodnotil veľmi negatívne.

4.4. Režim obmedzení v doprave – zúženie jazdných pruhov

V režime obmedzení v doprave – zúženie jazdných pruhov na 2,8 m so zabezpečením obojsmernej premávky a obmedzením rýchlosti na 30 km/hod. – sa realizovala výstavba dvoch oporných železobetónových múrov v rámci sanácie skalného previsu. Pôvodne plánovaným spôsobom uzávierky bola jednosmerná doprava riadená svetelnou signalizáciou. Zhotoviteľ sa s cieľom lepšej prejazdnosti rozhodol vykonávať práce pri zúžených pruhoch. Znova však platí, že obmedzenie pracovného priestoru malo vplyv na úpravu technológie a zníženie efektivity

prác. Zhotoviteľ plánoval pôvodne pracovať z vybudovaného lešenia, ktoré by zasahovalo do jedného jazdného pruhu. Takáto realizácia by umožnila vybudovanie pilierov v kratšom čase. Po zvážení všetkých možností a vyhodnotení vplyvu na dopravu pri jednom jazdnom pruhu prehodnotil spôsob budovania na úkor svojej výkonnosti.

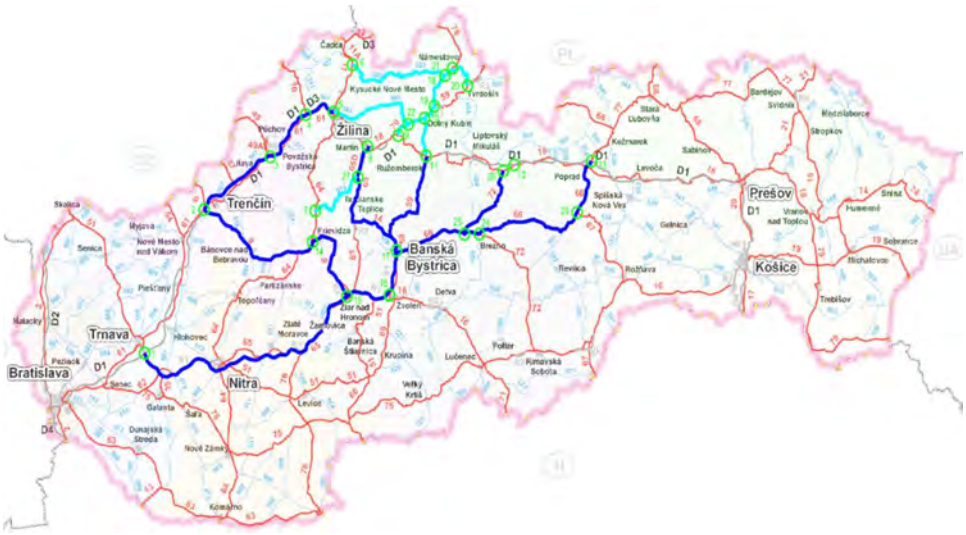
Na ceste I/18 Žilina – Strečno – Dubná Skala sa aj pri obojsmernej premávke v dopravných špičkách takmer denne vytvárajú rozsiahle kolóny. Realizácia prác pri jednosmernej premávke riadenej svetelnou signalizáciou v úseku by mala za následok kolaps dopravy v Žiline a časové straty užívateľov infraštruktúry by boli veľmi negatívne. Zvolené riešenie aj napriek predĺženiu času dopravných obmedzení malo akceptovateľný negatívny dopad na dopravu.

5. Vplyv sanačných prác na dopravno-bezpečnostnú situáciu

Úsek cesty I/18 Strečno – Vrútky (23 km) je dopravného hľadiska súčasťou európskej siete medzinárodných ciest s označením E50. Ročná priemerná denná intenzita dopravy z celoštátneho sčítania dopravy z roku 2015 dosahuje takmer 27 tis. vozidiel denne, pričom 25 % dopravného prúdu tvoria nákladné vozidlá. Situáciu sťažuje existencia iba jednej relevantnej obchádzkovej trasy po ceste II/583 Žilina – Terchová – Párnica – Kraľovany s obmedzením pre vozidlá do 7,5 t. Za účelom pomenovania incidentu a rizík vyplývajúcich z daného stavu a hľadania východísk pre zabezpečenie ochrany života, zdravia a majetku účastníkov cestnej premávky v rizikovom úseku cesty I/18 pred a počas sanácie skalného brala krízový štáb Okresného úradu v Žiline zasadal 24-krát.

Počas sanačných prác bolo vykonaných 15 úplných uzávierok počas víkendov a boli vyznačené obchádzkové trasy (obr. 6):

- pre vozidlá do 7,5 t – Žilina –II/583 Terchová – Párnica –I/70 Kraľovany – I/18 Vrútky (77 km);
- pre vozidlá nad 7,5 t – Žilina – D1 Trenčín– I/50 Prievidza – Žiar nad Hronom– R1 Zvolen – Banská Bystrica –I/14 Turčianske Teplice – I/65 Martin – I/18 Vrútky (291 km);
- alternatívna trasa pre regionálnu dopravu: Žilina –I/11 Krásno nad Kysucou – II/520 Lokca – I/78 Dolný Kubín –I/70 Kraľovany – I/18 Vrútky (155 km).



Obr. 6 Mapa obchádzkových trás
Fig. 6 Map of detour routes

Tieto uzávierky mali pre účastníkov cestnej premávky veľmi negatívny dopad vzhľadom na dĺžku obchádzkových trás, ako aj zvýšenie intenzity cestnej premávky na nich. Na vyznačenie uzávierky a obchádzkových trás na území Žilinského, Trenčianskeho, Trnavského, Nitrianskeho, Banskobystrického a Prešovského kraja bolo použitých 580 ks dopravných značiek a dopravných zariadení.

Na zabezpečenie bezpečnosti a plynulosti cestnej premávky bolo okrem iného potrebné:

- pred každou uzávierkou a po jej skončení vykonať kontrolu správnosti osadenia dopravného značenia na všetkých obchádzkových trasách,
- zabezpečiť nepretržitý dohľad na ceste I/18 v mieste uzávierky z obidvoch strán,
- zabezpečiť prejazd záchranných zložiek – Integrovaný záchranný systém 112 nahlásil na operačný odbor KR PZ v Žiline 158 nutnosť prejazdu vozidla záchranných zložiek, ktorý vyrozumel hliadku a tá v spolupráci s dodávateľom prác zabezpečila prerušenie prác, vyčistenie vozovky a následný prejazd vozidla,
- zabezpečiť zvýšený dohľad nad bezpečnosťou a plynulosťou cestnej premávky na obchádzkových trasách.

Počas sanačných prác v režime obmedzení v doprave bolo potrebné z hľadiska zabezpečenia plynulosti cestnej premávky zachovať v predmetnom úseku cesty obojsmernú premávku. Obmedzenia pre účastníkov cestnej premávky boli nasledovné:

- zúženie jazdných pruhov na 2,8 m a obmedzenie rýchlosti jazdy na 30 km/hod.,
- vyznačenie obmedzenia šírkovej prejazdnosti cesty,
- prejazd nadrozmerných vozidiel so šírkou väčšou ako 2,8 m iba za asistencie polície s úplnou uzávierkou cesty v danom úseku, realizované v nočných hodinách,
- pred začiatkom dopravného obmedzenia a po jeho skončení kontrola správnosti osadenia dopravného značenia,
- zvýšený dohľad nad bezpečnosťou a plynulosťou cestnej premávky.

6. Záver

Sanácia skalného brala pod hradom Strečno sa realizovala v extrémnych podmienkach, keď bol priebeh limitovaný aktuálnym zimným a jarným počasím. Sanačné práce vykonávané horolezeckým spôsobom kládli vysoké nároky na odbornú aj fyzickú zdatnosť pracovného a riešiteľského kolektívu. Sanačnými prácami bola zabezpečená stabilita vybraných najkritickejších blokov skalného brala a boli vybudované dva oporné múry na zabezpečenie stability previsu nad štátnou cestou. Okrem sanačných geologických a stavebných prác bolo pre riešenie úlohy potrebné zabezpečiť práce odborného geologického dohľadu, stavebného dozoru, koordinátora bezpečnosti na stavenisku (BOZP) a projekt a realizáciu dopravného značenia.

Vzhľadom na rozľahlosť skalného masívu, jeho porušenosť a skutočnosti zistené počas realizácie sanačných prác, je pre zníženie ohrozenia premávky potrebné pokračovať v sanácii ďalších porušených častí skalného brala. Nebezpečenstvo pádu horninových úlomkov a blokov pretrváva najmä po extrémnych alebo dlhotrvajúcich zrážkach a tiež v období topenia snehu. K minimalizovaniu rizík by významne prispeli vhodne situované dynamické bariéry.

S ohľadom na problematické obmedzovanie dopravy prichádza ďalšia sanácia do úvahy až po otvorení tunela Višňové. Ako najefektívnejšie riešenie pre elimináciu hroziacich rizík bolo odborníkmi navrhované vybudovanie ochrannej galérie. To však nie je možné bez úplného vylúčenia dopravy.

Zoznam literatúry

Bohátka, J., Sekyra Z., 2017: Skalné bralo Strečno. Blok v km 467.040 (st. silnica Žilina-Vrútky I/18) – MS SG Geotechnika a.s., Praha

Fekeč, P., Bohátka, J., Olišar, P., Mažgut, M., Prelovský, B., Sekyra, Z., 2017: Sanácia skalného brala Strečno, záverečná správa zo sanácie geologického prostredia. Bratislava. SG Geotechnika a.s., MŽP SR, 39 s., 25 príl., 1 d.

Malgot, J., Baliak, F., Mahr, T., Ondrášik, R., Sikora, J., Šajgalík, J., 1981: Inžinierskogeologické posúdenie hradného masívu Strečno: Expertíza. – MS Katedra geotechniky Stavebnej fakulty SVŠT, Bratislava.

Novotný, M., Slivovský, M., Fraštia, M., Mužík, J., Šíma, J., Slašťan, P., Pistová, D., Vlčko, J., Greif, V., 2015: Inžinierskogeologický prieskum skalného brala v Strečne, podrobný IGP Žilina. RNDr. Miroslav Novotný, 43 s., 9 príl., 1 d.

Olišar, P., Steiger, M., Bohátka, J., 2016: Správa o skutočnom stave skalného brala Strečno – MS SG Geotechnika a.s., Bratislava.

Petro, Ľ., Iglárová, Ľ., 2015: Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi. Správa za rok 2015. Názov geologickej úlohy: ČMS Geologické faktory Podsystém 06: Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi. ŠGÚDŠ, Bratislava.

Slivovský, M., Sýkora, J., 2015: Hrad Strečno, sanácia skalného bloku – previsu na skalnom brale pod kaplnkou, geotechnický posudok. GEOstatik, a.s., Žilina.

Šimeková, J., Páleník, M., Sluka, V., 2017: Sanácia skalného brala Strečno, odborný geologický dohľad pri sanácii skalného brala Strečno. Žilina, Geotrend, Bratislava, MŽP SR, 51 s., 4 viaz. príl., 1 d.

ŠTATISTICKÉ METÓDY HODNOTENIA ZOSUVNÉHO HAZARDU NA SLOVENSKU

STATISTICAL METHODS OF LANDSLIDE HAZARD EVALUATION IN SLOVAKIA

Rudolf Tornyai, Martin Bednarik

[1]*Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: rudolf.tornyai@uniba.sk*

Abstrakt: Problematika prognózovania zosuvného hazardu je riešená pomocou štatistických metód v prostredí geografických informačných systémov (GIS). V príspevku sú opísané najpoužívanejšie kvantitatívne metódy hodnotenia zosuvného hazardu: bivariačná štatistická analýza, multivariačná štatistická analýza a analýza pomocou neurónovej siete. Výsledné zhodnotenie zosuvného hazardu bolo vypracované pomocou prognóznych rastrových máp s veľkosťou základnej bunky 10 x 10 m. Záverečné rozdelenie do tried náchylnosti prebehlo zaužívaným semaforovým spôsobom do 5 tried. V príspevku boli na verifikáciu stupňa úspešnosti zostavených prognóznych máp zosuvného hazardu použité ROC krivky. Prognózna mapa zosuvného hazardu zostavená požitím neurónovej siete má hodnotu AUC rovnú 0,828, čo predstavuje úspešnosť tejto mapy 82,8 %. Úspešnosť mapy zostavenej multivariačnou metódou je 91,9 %. Výsledok bivariačnej metódy má hodnotu úspešnosti 85,2 %.

Abstract: The issue of landslide hazard prediction is solved using statistical methods in the environment of geographic information systems (GIS). The paper describes the 3 most used quantitative methods of landslide-hazard assessment. Bivariate, multivariate statistical analyses and neural network analysis. The final assessment of the landslide hazard was developed using prognostic raster maps with a basic cell size of 10x10 m. The final division into susceptibility classes was implemented by applying the usual semaphore method in 5 classes. ROC curves were used to verify the degree of success of the landslide hazard prediction maps compiled. The landslide-hazard prognostic map compiled using neural network has an AUC value of 0.828, which represents a success rate of 82.8%. The success rate of the map compiled by the multivariate method is 91.9%. The result of the bivariate method has reached a success rate of 85.2%.

Kľúčové slová: zosuvný hazard, multivariačná štatistická analýza, bivariačná štatistická analýza, neurónové siete

Key words: landslide hazard, multivariate statistical analysis, bivariate statistical analysis, neural networks

1. Úvod

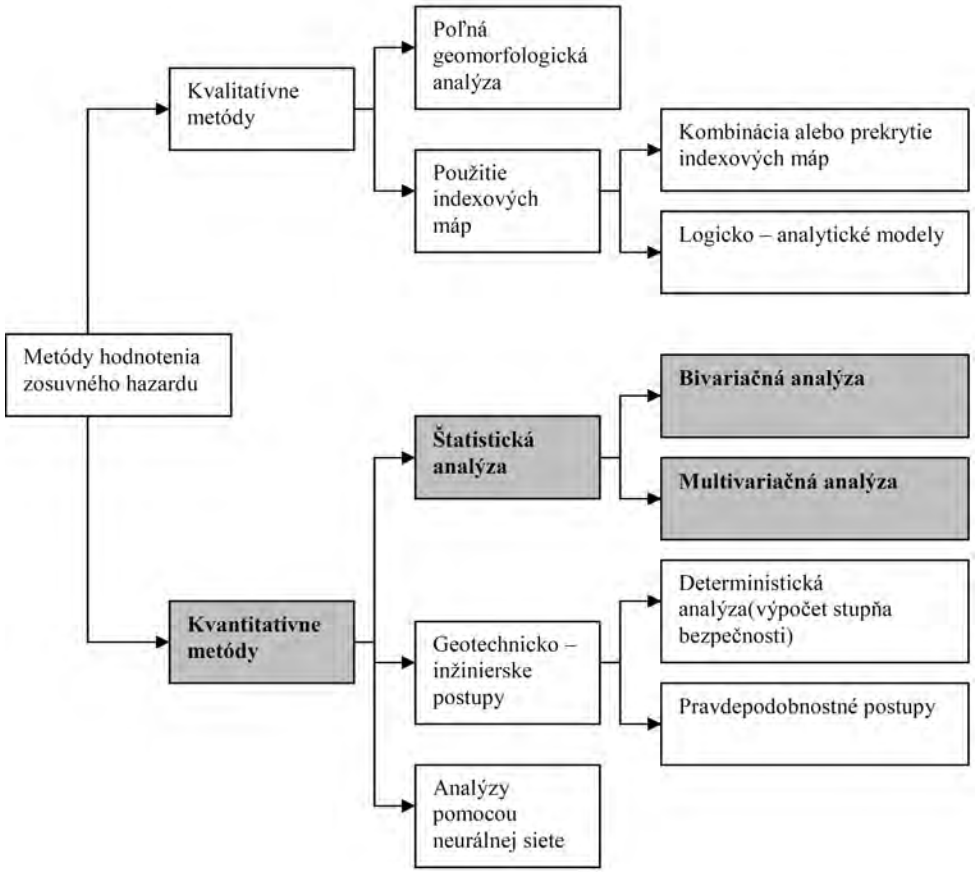
V súčasnej dobe z dôvodu klimatických zmien a s nimi súvisiacich vysokých úhrnov zrážok sa zosuvy vyskytujú čoraz častejšie. Len na Slovensku sa v roku 2010 reaktivizovalo 577 zosuvov, ktoré výrazným spôsobom ovplyvňujú nielen výstavbu diaľnic, či tunelov, ale aj bežný život ľudí, keďže sa vyskytujú aj v urbanizovaných oblastiach a priamo ohrozujú

nehnuteľnosti a infraštruktúru. Predstavujú tak nielen u nás, ale aj v mnohých oblastiach sveta významnú environmentálnu hrozbu. Práve preto vzbudzujú pozornosť mnohých odborníkov, ktorí sa orientujú najmä na analýzu faktorov vzniku zosuvov. Cieľom je vytvorenie prognózy, podľa ktorej by sme boli schopní s vysokou pravdepodobnosťou predpovedať vznik a vývoj zosuvov v budúcnosti. Výsledkom je vznik a vývoj rôznych metód hodnotenia zosuvného hazardu najmä pomocou geografických informačných systémov (GIS). Na Slovensku sa od prvých publikácií a štúdií zaoberajúcich sa hodnotením zosuvného hazardu s využitím štatistických metód (Pauditš & Bednarik (2002), Pauditš (2006), Bednarik (2007), vytvorilo niekoľko prác a máp náchylnosti na zosúvanie v rôznych mierkach (Jurko, (2003) Pauditš a kol.. (2006), Krumpálová (2008), Magulová (2009, Petrýdesová (2012), Tornyai (2013, 2016).

2. Metódy hodnotenia zosuvného hazardu

Problematika prognózovania zosuvného hazardu je riešená pomocou štatistických metód v prostredí geografických informačných systémov (GIS). V rámci geologických faktorov, ktoré nepriaznivo vplývajú na kvalitu životného prostredia, patria k najvýznamnejším práve svahové pohyby. Na aktivizácii svahových deformácií sa v našich podmienkach výraznou mierou, okrem antropogénnych zásahov, podieľajú klimatické pomery. Ich dlhodobá analýza umožňuje so značným stupňom pravdepodobnosti prognózovať podmienky, po dosiahnutí ktorých môže dôjsť k reaktivizácii svahových pohybov i v regionálnom rozsahu.

Metódy hodnotenia zosuvného hazardu (obr. 1) vo všeobecnosti delíme na kvalitatívne a kvantitatívne.



Obr. 1 Metódy hodnotenia zosuvného hazardu
Fig. 1 Landslide hazard assessment methods

Metodika hodnotenia zosuvného hazardu pomocou štatistických metód v prostredí GIS je založená na vhodnom výbere faktorov, ktoré majú vplyv na stabilitu svahov. Štatistické spracovanie zosuvného hazardu a prognóz vychádza z princípu aktualizmu geologických javov a procesov, teda platí, že zosuvy sa budú vyskytovať na miestach, kde sa vyskytovali v minulosti, resp. v súčasnosti za podobných podmienok aktivizácie. Vybrané faktory, vplývajúce na vznik a vývoj svahových pohybov, sú spracované do formy parametrických máp a takto vstupujú do procesu štatistického hodnotenia pomocou mapovej algebry v GIS prostredí. Podľa zvolenej štatistickej metódy nasleduje porovnanie parametrických máp faktorov s mapou inventarizácie zosuvov na modelovom území. Závery vyplývajúce zo štatistického porovnania sa následne extrapolujú na celé hodnotené územie a výsledkom jeprognózna mapa hazardu. Prognóznu mapu zosuvného hazardu je potrebné na základe matematického rozdelenia (napr. mediánu, smerodajnej odchýlky a iných) rozdeliť do troch (nízky, stredný, vysoký stupeň hazardu) alebo piatich (veľmi nízky, nízky, stredný, vysoký, veľmi vysoký stupeň hazardu) zaužívaných kategórií, reprezentujúcich rovnaký stupeň zosuvného hazardu.

V príspevku sú opísané 3 najpoužívanejšie kvantitatívne metódy hodnotenia zosuvného hazardu.

2.1 Bivariačná štatistická analýza s určením váh jednotlivých parametrov

Táto metóda predstavuje štatistickú kombináciu každej vstupnej parametrickej mapy s mapou zosuvov. Bivariačná štatistická analýza pracuje s jednou závislou premennou (mapa zosuvov) a s jednou nezávislou premennou (jednotlivé vstupné parametrické mapy). Výsledkom kombinácie je určenie celkového počtu buniek gridu so zosuvmi a bez zosuvov v jednotlivých triedach parametrov, prepočítaných na jednotku plochy alebo percentá. Dvojkombinácie sú uložené v tabuľkovej forme, kde jedno z čísel predstavuje triedu v parametrickej mape a druhé číslo predstavuje prítomnosť resp. neprítomnosť zosuvu (0 – false, 1 – true).

Veľký vplyv na presnosť výsledku má dôslednosť technickej prípravy parametrických máp, hlavne rozdiely v polohovej presnosti, superpozícii a geometrii gridu. Na základe takto získaných kombinácií je nutné každú parametrickú mapu druhotne reklasifikovať. Pri druhotnej reklasifikácii sa existujúcim triedam v každej parametrickej mape priradia nové numerické hodnoty reprezentujúce štatisticky určenú pravdepodobnosť na zosúvanie. Najvyššia číselná hodnota je priradená triede najviac náchylnej na zosúvanie a naopak trieda s najnižšou numerickou hodnotou je najmenej náchylná na zosúvanie. Pred samotným sčítaním druhotne reklasifikovaných parametrických máp je nevyhnutné určenie váhy jednotlivých parametrov. Výsledkom bivariačnej štatistickej analýzy je mapa zosuvného hazardu, ktorá vznikne váženým súčtom druhotne reklasifikovaných parametrických máp. Princíp multivariačnej štatistickej analýzy je zobrazený na obr. 2.

2.2 Multivariačná štatistická analýza – podmienková analýza

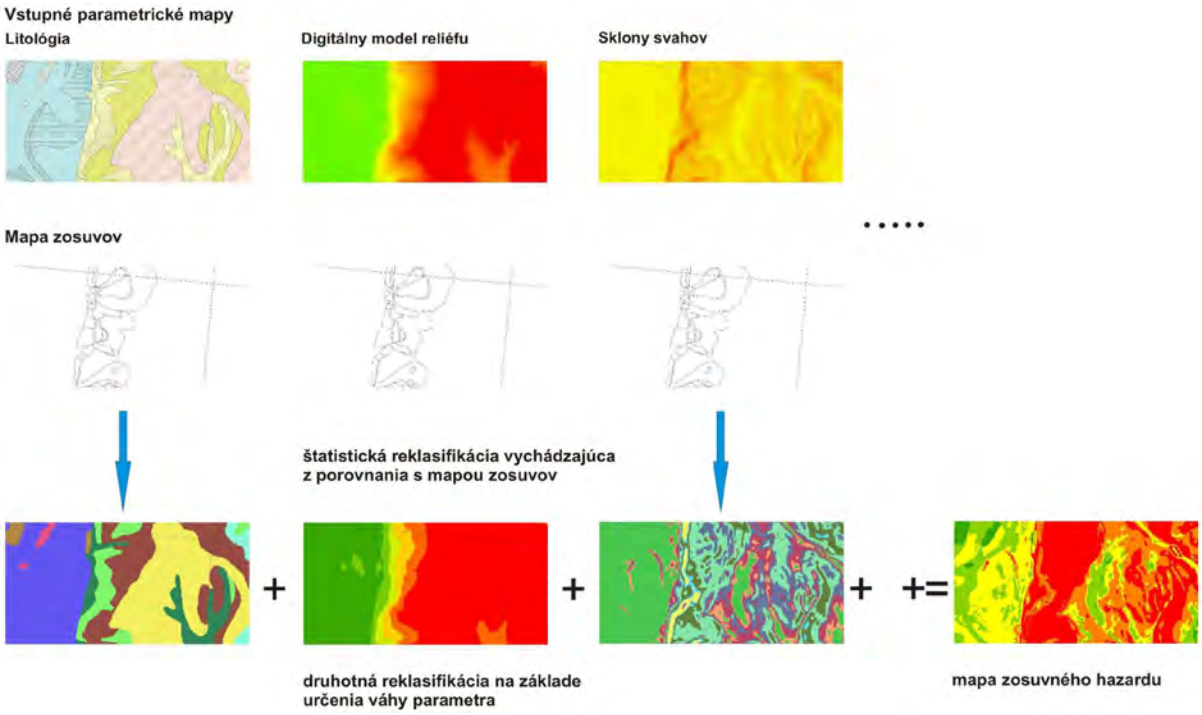
Zo skupiny multivariačných štatistických analýz je najčastejšie aplikovaná podmienková analýza, ktorá je založená na kombinácii všetkých vstupných parametrických máp súčasne s následným rozšírením informácií na územie, kde neboli vymapované žiadne zo svahových pohybov. Pri multivariačnej štatistickej analýze nevstupuje do hodnotenia geohazardu proces váženia.

Kombinované boli rastrové modely obsahujúce priestorové informácie o geologických pomeroch, morfometrické parametre reliéfu (sklon svahov, orientácia svahov), súčasná

krajinná štruktúra a svahové deformácie. Z tejto kombinácie vznikli kvázihomogénne jednotky (UCU) jednoduchým preložením rastových modelov.

Pred vstupom do multivariačnej analýzy nie je potrebná druhotná reklasifikácia, a ako už bolo spomenuté, ani žiadne váženie parametra. Výsledné kombinácie, v ktorých sa nachádzajú zosuvy (hodnota 1, true v mape zosuvov), sa zoradia na základe vypočítanej intenzity výskytu – pomer počtu buniek UCU so zosuvmi k celkovej ploche UCU (výsledok usporiadaný zostupne uvádza kombinácie, ktoré sú z hľadiska zosúvania najnepriaznivejšie) (Bednarik, 2011).

Princíp multivariačnej štatistickej analýzy je zobrazený na obr. 3.



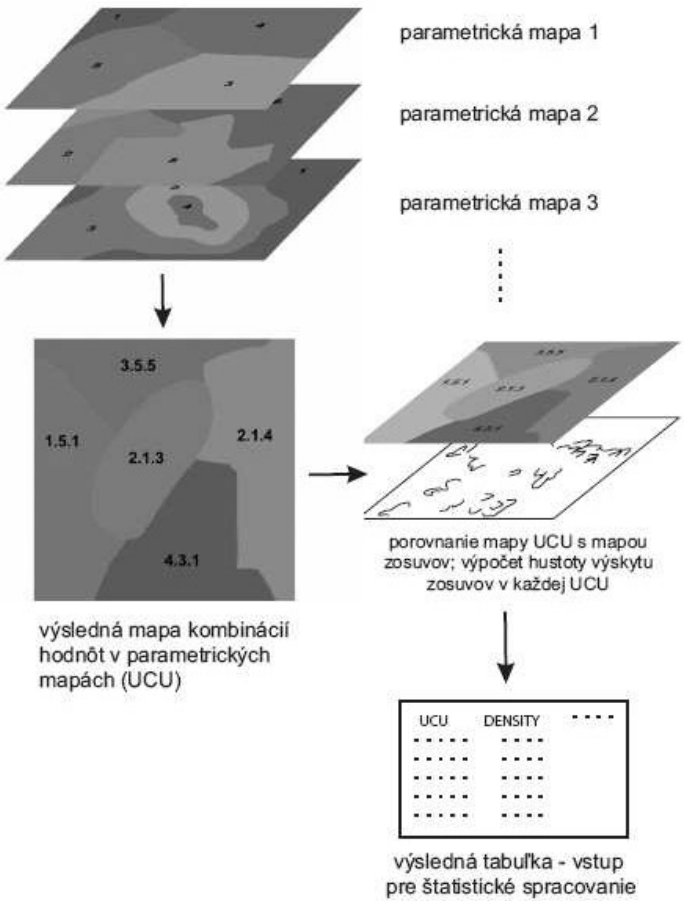
Obr. 2 Princíp bivariačnej štatistickej analýzy (Bednarik, 2011)
Fig. 2 Principle of bivariate statistical analysis

2.3 Neurónová sieť

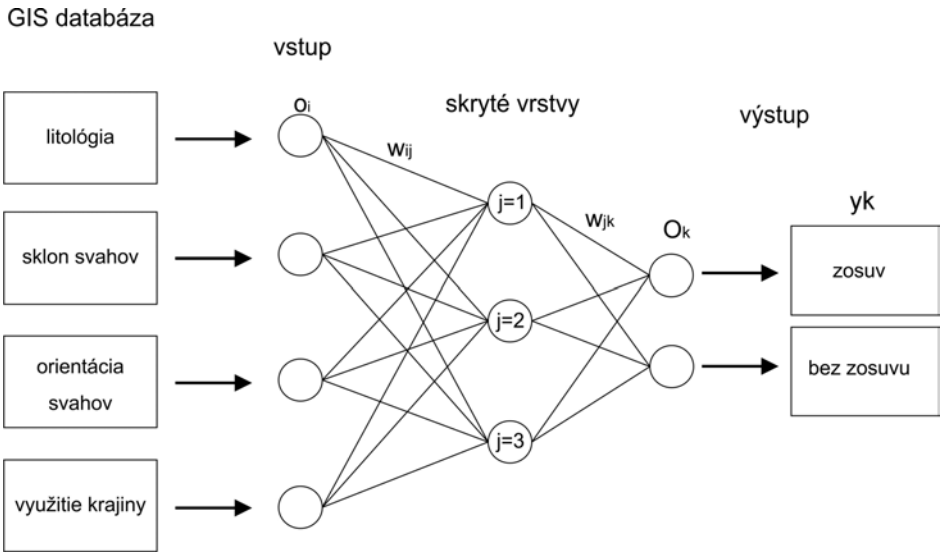
Použitie neurónovej siete (NN) na interpretáciu údajov z diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) bolo motivované schopnosťou veľmi efektívne spracovávať veľké množstvo dát z rôznych zdrojov.

Pre hodnotenie zosuvného hazardu sa najčastejšie používa viacvrstvová dopredná neurónová sieť, tzv. viacvrstvový perceptrón (MLP) a učiaci algoritmus so spätným šírením chyby. MLP, ako vyplýva z názvu, sa skladá z radu vrstiev, z ktorých každá sa skladá zo sady uzlov (neurónov). Pri doprednej neurónovej sieti existujú iba dopredné spojenia medzi neurónmi, každý neurón jednej vrstvy vysiela signály na každý neurón nasledujúcej vrstvy, spojenia do predchádzajúcej vrstvy ani v rámci jednej vrstvy neexistujú. Neurónová sieť sa skladá z niekoľkých vzájomne prepojených uzlov. Každý uzol je jednoduchý element, ktorý odpovedá na vážené vstupy, ktoré dostáva od ostatných uzlov. Usporiadanie uzlov označujeme ako architektúru neurónovej siete (obr. 4).

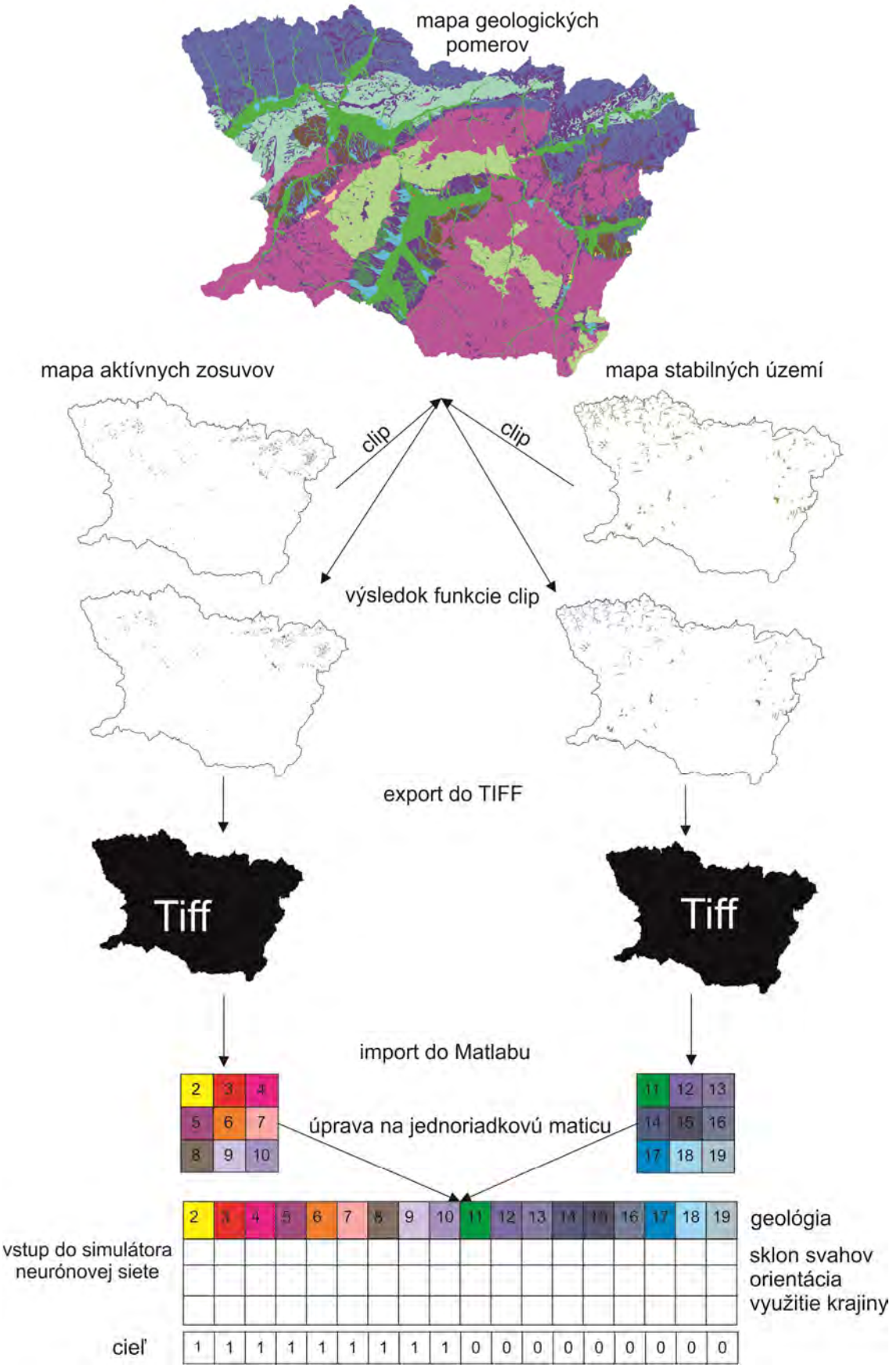
Pre hodnotenie zosuvného hazardu pomocou neurónovej siete je potrebné vytvorenie vzorového súboru dát a matice – každá mapa predstavuje jeden riadok matice. Postup tvorby matice vstupujúcej do simulátora neurónových sietí je uvedený na obr. 5.



Obr. 3 Princíp multivariačnej štatistickej analýzy (Pauditš, 2005)
Fig. 3 Principle of multivariate statistical analysis



*Obr. 4 Architektúra doprednej neurónovej siete: kde w_{ij} a w_{jk} predstavujú váhy, O_k predstavuje hodnoty pre skryté vrstvy, a **yk** predstavuje závislú premennú, ktorá udáva stupeň náchylnosti aktuálneho pixelu na zosúvanie*
*Fig. 4 Forward neural network architecture: where w_{ij} and w_{jk} represent weights, O_k represents values for hidden layers, and **yk** represents a dependent variable that indicates the degree of susceptibility of the current pixel to sliding*



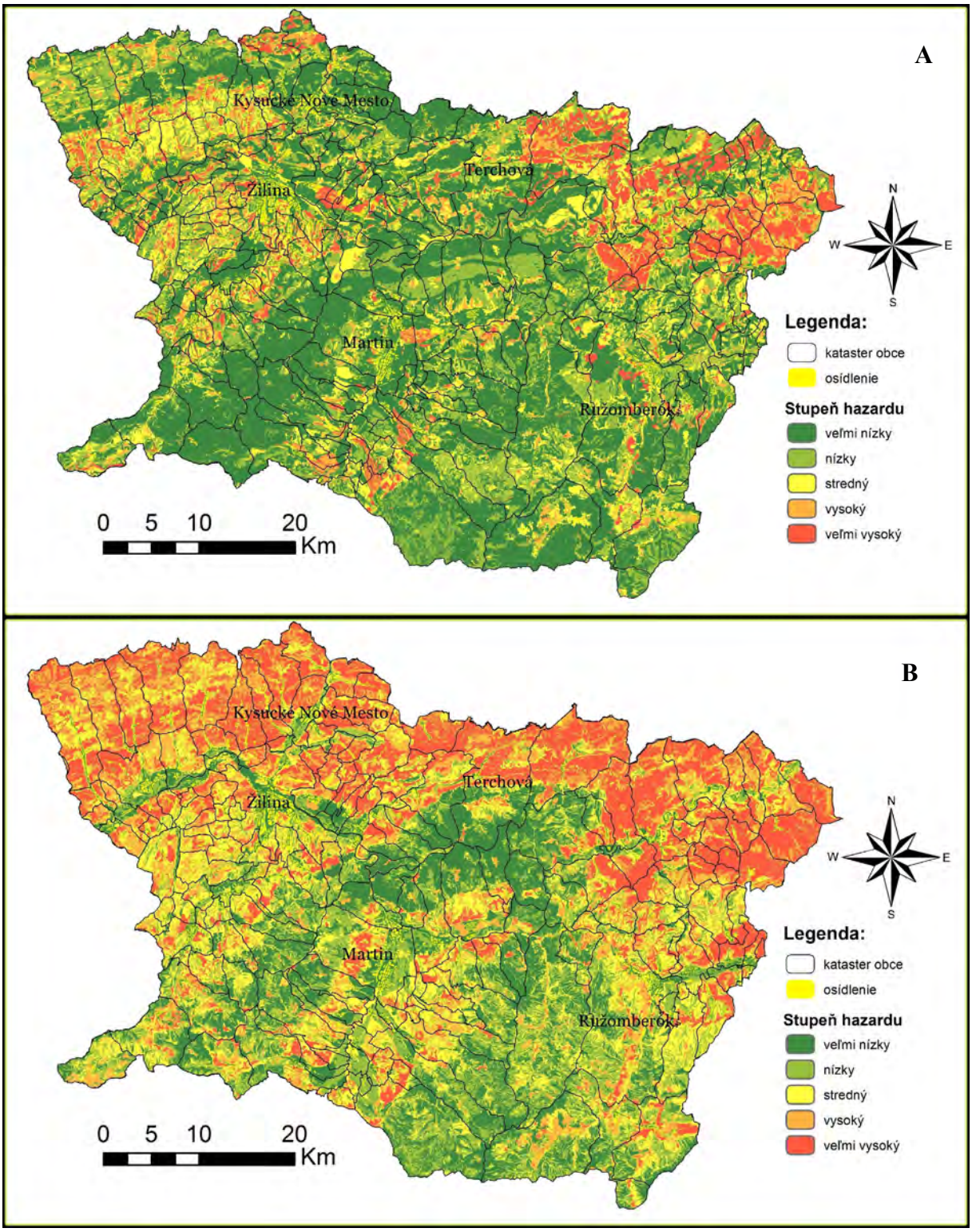
Obr. 5 Postup tvorby matice vstupujúcej do simulátora neurónovej siete (Tornyai, 2016)
Fig. 5 The process of creating a matrix entering the neural network simulator

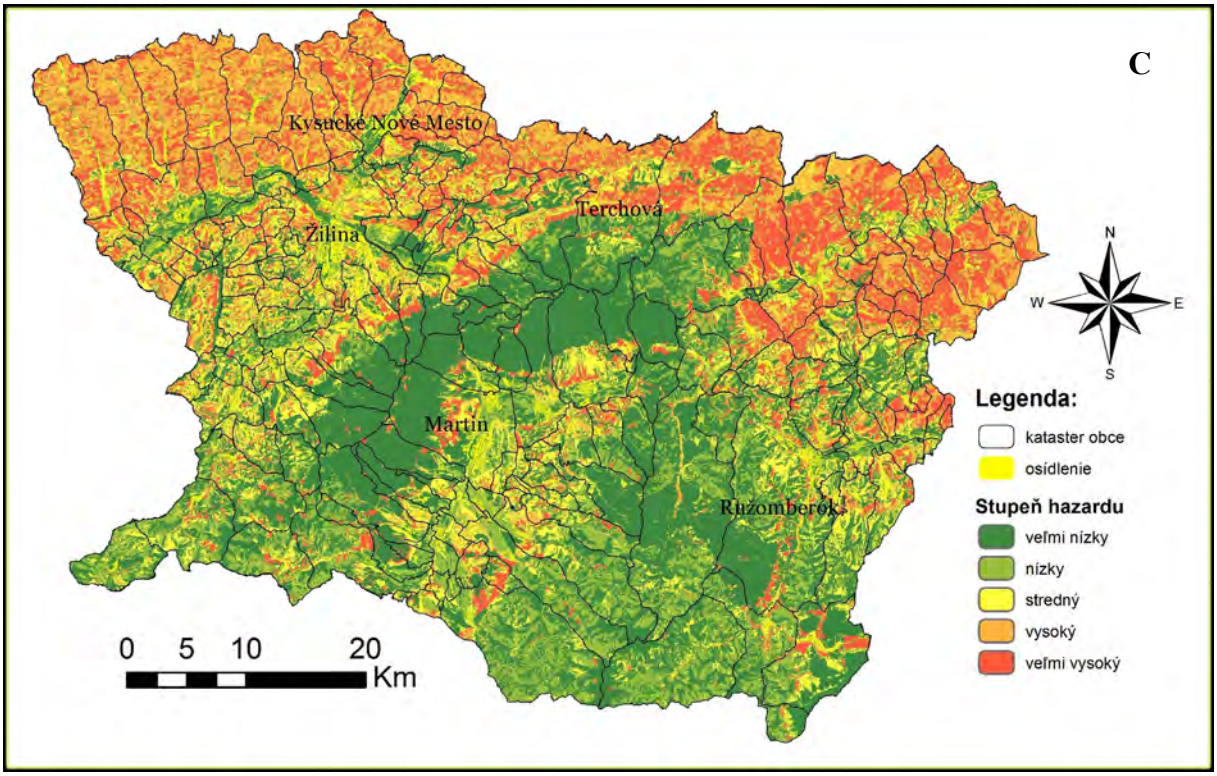
3. Výsledky a diskusia

V tejto kapitole opisujeme v skratke výsledky jednotlivých metód na modelovom území Žilinského regiónu. Výstupom sú tri mapy zosuvného hazardu (obr. 6). Pri spracovaní výsledných prognóznych máp zosuvného hazardu bolo použité rozdelenie do piatich tried. Rozdelenie do 5 tried sa javí ako vhodnejšie v porovnaní s často používaným rozdelením do 3 tried, pretože hranice medzi jednotlivými triedami sú detailnejšie definované. Konečná reklasifikácia kvantitatívne definovaných výsledkov je pomerne zložitý proces. Tento spočíva v určení konkrétnych hraníc medzi jednotlivými kategóriami stupňa zosuvného hazardu. Pri záverečnej reklasifikácii do jednotlivých tried náchylnosti je nevyhnutne postupovať s ohľadom na konkrétne podmienky skúmaného územia a definovať charakter vzniknutého súboru výsledkov. Vzhľadom na možnosť relevantného posúdenia výsledkom bolo zatriedenie do tried vykonané automatizovaným spôsobom v prostredí ArcGIS.

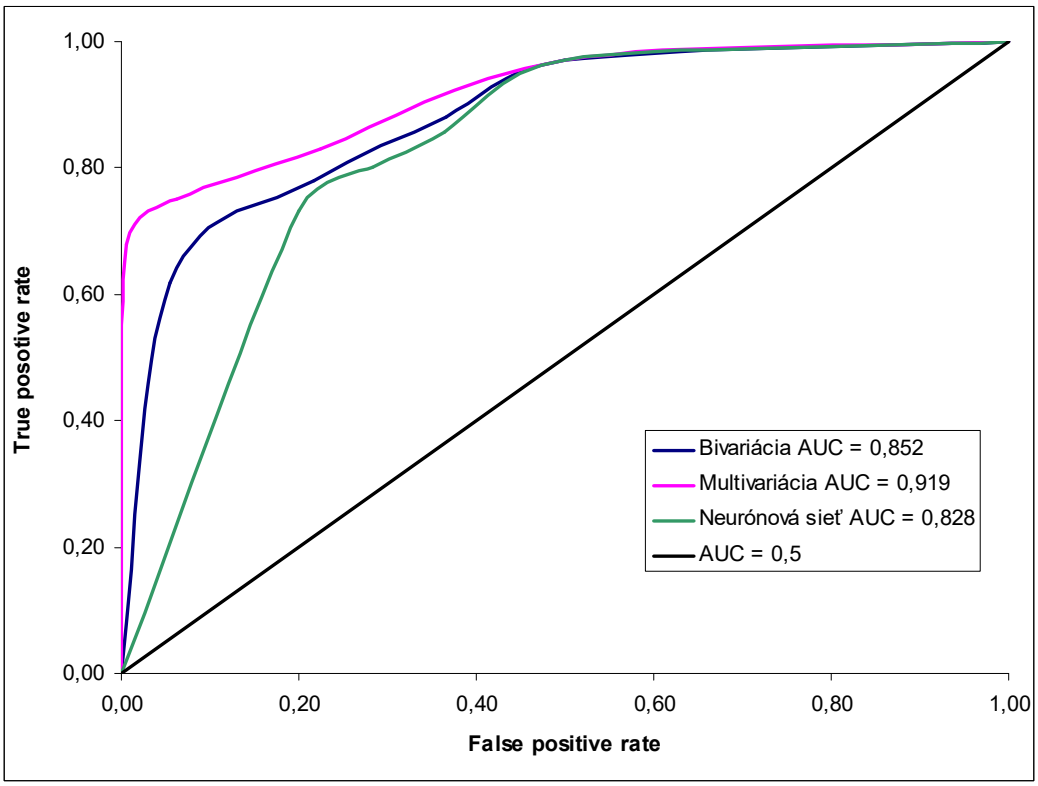
Po spracovaní prognóznej mapy je potrebné ju verifikovať, teda overiť jej výpovednú hodnotu. V príspevku boli na verifikáciu stupňa úspešnosti zostavených prognóznych máp zosuvného hazardu použité ROC (ROC – Receiver Operating Characteristics, vo voľnom preklade prijímacie operačné charakteristiky) krivky. Veľkosť plochy pod krivkou (AUC – Area Under Curve) určuje celkovú kvalitu prognózneho modelu; čím je plocha väčšia, tým je model úspešnejší. Maximálna plocha grafu je 1 (ideálny model), plocha pre model s úspešnosťou 50 % má AUC = 0,5 (trivial model). To znamená, že čím je veľkosť plochy bližšia k hodnote 1, tým je model presnejší. Vypočítané ROC krivky jednotlivých modelov sú zobrazené na obr. 7.

Prognózna mapa zosuvného hazardu zostavená požitím neurónovej siete má hodnotu AUC rovnú 0,828, čo predstavuje úspešnosť tejto mapy 82,8 %. Úspešnosť mapy zostavenej multivariačnou metódou je 91,9 %. Výsledok bivariačnej metódy má hodnotu úspešnosti 85,2 %. Z výsledkov možno konštatovať, že multivariačná štatistická analýza zobrazila skúmanú oblasť s najvyššou úspešnosťou. Výsledky ukazujú, že každý zostavený prognózny model možno považovať za úspešný. Manuálnou úpravou, ktorá si však vyžaduje značné skúsenosti, by bolo možné všetky prognózne modely ‘‘vyladiť‘‘ a dosiahnuť tak vyššie percentá úspešnosti.


A
Kysucké Nové Mesto
Žilina
Terchová
Martin
Ružomberok
N
W
E
S
Legenda:
kataster obce
osídlenie
Stupeň hazardu
veľmi nízky
nízky
stredný
vysoký
veľmi vysoký
0 5 10 20
Km
B
Kysucké Nové Mesto
Žilina
Terchová
Martin
Ružomberok
N
W
E
S
Legenda:
kataster obce
osídlenie
Stupeň hazardu
veľmi nízky
nízky
stredný
vysoký
veľmi vysoký
0 5 10 20
Km



Obr. 6 Prognózna mapa zosuvného hazardu zostavená metódou: A- neurónová sieť, B – bivariačná analýza, C – multivariačná analýza
Fig. 6 Prognosis landslide hazard map compiled by the method: A - neural network, B - bivariate analysis, C - multivariate analysis



Obr. 7 ROC krivky prognóznych modelov
Fig. 7 ROC curves of prognosis models

4. Záver

V príspevku boli veľmi stručne opísané štatistické analýzy hodnotenia zosuvného hazardu, ktoré boli aplikované na území Slovenska. Použité bolo modelové územie Žilinského regiónu vzhľadom nato, že v území sa vyskytujú svahové deformácie v dostatočnom rozsahu, ide o územie, pre ktoré je charakteristická aktuálna antropogénna aktivita a územie je dostatočne preskúmané. Príprava vstupných parametrov a vizualizácia výsledných máp bola spracovaná v prostredí ArcGIS, rovnako ako aj bivariačná a multivariačná štatistická analýza. Samotný výpočet neurónovej siete prebehol v prostredí Matlab. Štatistické spracovanie prognóznych máp zosuvného hazardu vychádza z princípu aktualizmu, teda z predpokladu, že svahové poruchy sa budú v budúcnosti vyskytovať s väčšou pravdepodobnosťou v podmienkach, v ktorých vznikali v minulosti, alebo vznikajú v prítomnosti.

Výsledné zhodnotenie zosuvného hazardu bolo vypracované pomocou prognóznych rastrových máp s veľkosťou základnej bunky 10 x 10 m. Záverečné rozdelenie do tried náchylnosti prebehlo zaužívaným semaforovým spôsobom do 5 tried. Neurónová sieť ukázala, že najnáchylnejšie podmienky na vznik svahovej deformácie predstavujú flyšové sedimenty v oblasti pastvín, pri sklone svahov 7 až 11°, orientovaných na severozápad. Pre porovnanie, bivariačná štatistická analýza ukázala ako najnáchylnejšie svahové sedimenty so sklonom 7 až 11° v oblasti lesov so svahmi orientovanými južne. Rovnako aj multivariačná štatistická analýza označila svahy sklonov 7 až 11°, orientovaných na sever v oblasti záhrad ako najnáchylnejšie.

Zoznam literatúry

Bednarik, M., 2011: Štatistické metódy pri hodnotení zosuvného hazardu a rizika. Bratislava: PRIF UK v Bratislave, Habilitačná práca.

Bednarik, M. Hodnotenie zosuvného rizika pre potreby územnoplánovacej dokumentácie. Bratislava: PRIF UK, 2007, Dizertačná práca.

Jurko, J., 2003: Mapa náchylnosti územia Liptovskej kotliny na zosúvanie. Diplomová práca, Katedra inžinierskej geológie PriF UK, Bratislava, 47 s.

Krumpálová, M., 2008: Hodnotenie hrozby zosúvania v Breznianskej kotline. Diplomová práca. Katedra fyzickej geografie a geoekológie PriFUK, Bratislava, 64 s.

Magulová, B., 2009: Použitie GIS pre tvorbu máp geohazardov ako podkladov pre urbanizačné plánovanie. Acta Geologica Slovaca, 1, 1, s. 25-32.

Pauditš, P., Vlčko, J., Jurko, J., 2006: Využitie štatistických metód v hodnotení náchylnosti územia na zosúvanie. Mineralia Slovaca, 37, 4, s. 529-538.

Pauditš, P. a Bednarik, M., 2002: Using GIS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovská kotlina basin. Proceedings of the 1st European conference on landslide, Swets & Zeitlinger, Lisse, Praha, Czech Rep., s. 437-441.

Pauditš, P., 2005: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Bratislava: PRIF UK v Bratislave. Kandidátska dizertačná práca.

Pauditš, P., 2006: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Geologické práce, Správy, 112, Bratislava, s. 41-58.

Petrýdesová, L., 2012: Hodnotenie zosuvného hazardu v modelovom území Hlohovec – Sereď. Dizertačná práca. Katedra inžinierskej geológie PriF UK, Bratislava, 206 s.

Tornyai R., 2016: Aplikácia neurónovej siete pri hodnotení zosuvného hazardu. Bratislava: PRIF UK v Bratislave, Dizertačná práca práca.

Tornyai, R., Bednarik, M., Havlín, A., 2016: Application of neural network to assess landslide hazardand comparison with bivariate and multivariate statistical analyses. In: Acta Geologica Slovaca (AGEOS). - Roč. 8, č. 1 (2016), s. 109-118.

Tornyai, R., Dunčko, M., 2013: Použitie bivariačnej a multivariačnej analýzy na hodnotenie zosuvného hazardu Kysuckého regiónu (Západné Karpaty), Acta Geologica Slovaca (AGEOS), 5(2), 2013, s. 179 – 193

VÝSLEDKY A ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE INŽINIERSKOGEOLOGICKÉHO MAPOVANIA SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÍ V BIELYCH KARPATOCH

RESULTS AND STATISTIC EVALUATION OF LIDAR-BASED ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING OF SLOPE DEFORMATIONS IN THE BIELE KARPATY MTS. REGION

Ivan Dananaj[1], Pavel Liščák[1], Peter Pauditš[1], Peter Ondrus[1], Peter Ondrejka[1], Ľubica Iglárová[1], Barbora Ondrášiková[1], František Teťák[1], Róbert Žjak[1], Matej Gužík[1], Juraj Papčo[2], Marek Fraštia[3]

[1] Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11, Slovenská republika
e-mail: ivan.dananaj@geology.sk
[2]Slovenská technická univerzita, Bratislava, Stavebná fakulta, Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: juraj.papco@stuba.sk
[3] Slovenská technická univerzita, Bratislava, Stavebná fakulta, Katedra geodézie, Bratislava
e-mail: marek.frastia@stuba.sk

Abstrakt: V rámci geologickej úlohy „Identifikácia, registrácia a inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií“, sa ŠGÚDŠ venuje prieskumu piatich oblastí významne ohrozených svahovými deformáciami. Ide o pohoria Biele Karpaty a Javorníky, budované flyšovými horninami a častí pohorí Vtáčnik, Slanské vrchy – západ a priľahlá časť Košickej kotliny a Vihorlatské vrchy – severná časť, budované vulkanickými horninami a neogénnymi sedimentmi. Inžinierskogeologické mapovanie je zamerané na identifikáciu svahových deformácií pomocou presného DMR 5.0 a GNSS technológií, ako aj spresnenie poznatkov o priestorovom rozšírení prítomných litologických komplexov predkvartérnych hornín a kvartérneho pokryvu. V príspevku uvádzame aktuálne výsledky mapovania svahových deformácií z oblasti Bielych Karpát, ich štatistické zhodnotenie a ich porovnanie s Atlasom máp stability svahov Slovenskej republiky.

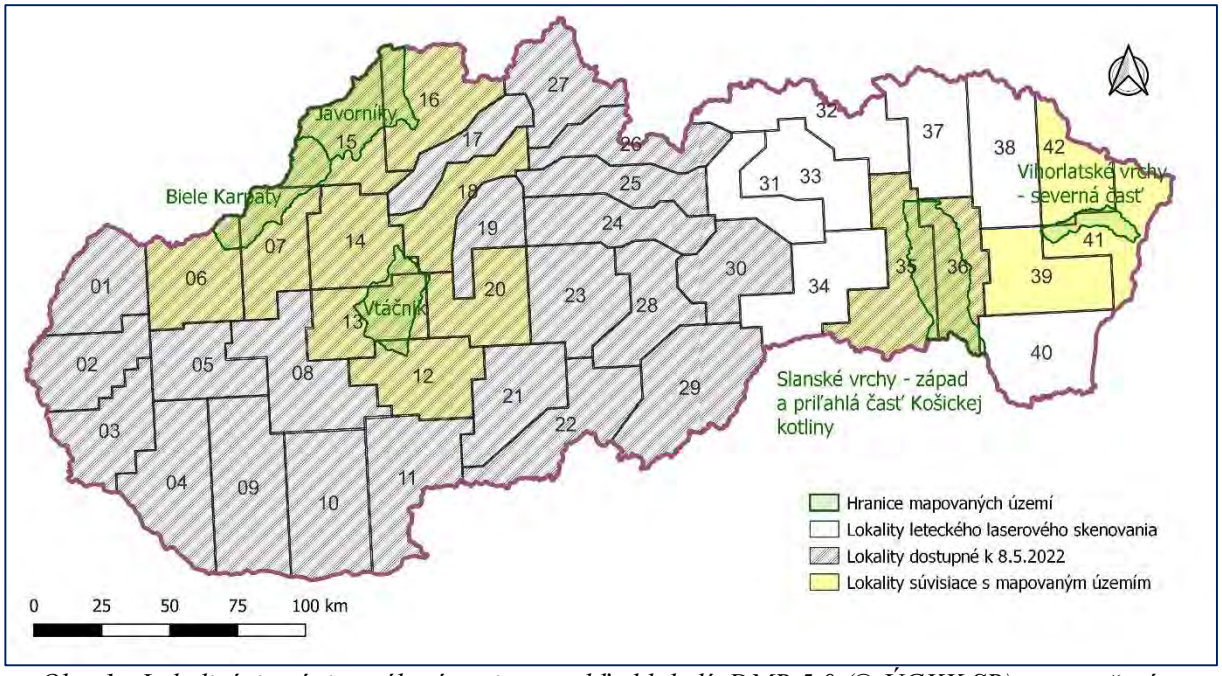
Abstract: Within the geological task "Identification, inventory and engineering geological mapping of slope deformations", ŠGÚDŠ is engaged in the survey of five areas significantly endangered by slope deformations. These are the Biele Karpaty and Javorníky Mts., built by flysch rocks and parts of the Vtáčnik Mts., Slanské vrchy Mts. – west and the adjacent part of the Košická kotlina Basin and Vihorlatské vrchy Mts. – northern part, built by volcanic rocks and Neogene sediments. Engineering geological mapping is focused on the identification of slope deformations using accurate DMR 5.0 and GNSS technologies, as well as refinement of the knowledge on the spatial distribution of lithological complexes of Pre-Quaternary rocks and Quaternary cover. In this paper we present the current results of mapping of slope deformations in the Biele Karpaty Mts., their statistical evaluation and their comparison with the Atlas of Slope Stability Maps of the Slovak Republic.

Kľúčové slová: LiDAR, DMR, svahové deformácie, inžinierskogeologické mapovanie, rozdielová mapa

Key words: LiDAR, DEM, slope deformations, engineering geological mapping, change detection map

1. Úvod

V období rokov 2018 – 2023 sa v rámci operačného programu Kvalita životného prostredia geologická úloha „Identifikácia, inventarizácia a inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií“ stala jednou z kľúčových činností Oddelenia inžinierskej geológie Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra (ŠGÚDŠ). Je zameraná na orientačný inžinierskogeologický prieskum piatich oblastí významne ohrozených svahovými deformáciami. Ide o pohoria Biele Karpaty (606,27 km^2) a Javorníky (869,53 km^2), budované flyšovými horninami a časti pohorí Vtáčnik (566,52 km^2), Slanské vrchy – západ a priľahlá časť Košickej kotliny (937,46 km^2) a Vihorlatské vrchy – severná časť (215,24 km^2), budované vulkanickými horninami a neogénnymi sedimentmi. Celková rozloha všetkých záujmových území je 3 195,02 km^2. Geologické práce sa v rámci inžinierskogeologického prieskumu realizujú priebežne na všetkých piatich záujmových územiach v závislosti od postupnosti získavania nevyhnutných topografických podkladov – Digitálneho modelu reliéfu (DMR 5.0; © GKÚ). Lokalizácia záujmového územia a jeho vzťah k dostupnému topografickému podkladu je na obr. 1. Terénne práce sú naviac rozpracované v regióne Bielych Karpát, pretože z časti tohto územia bol k dispozícii DMR 5.0 už v roku 2019. Územie Bielych Karpát zahŕňa 57 mapových listov Základnej mapy Slovenskej republiky 1 : 10 000 (ZM10).



Obr. 1:. Lokalizácia záujmového územia a prehľad lokalít DMR 5.0 (© ÚGKK SR) s vyznačením spracovaných lokalít k 8. 5. 2022
Fig. 1: Location of the area of interest and overview of DEM 5.0 (© ÚGKK SR) localities with marking of available localities as of 8. 5. 2022

2. Metodika riešenia

Riešenie geologickej úlohy spočíva v súbore prác orientačného inžinierskogeologického prieskumu, po častiach v logickej nadväznosti (Liščák a kol., 2018):

- tvorba podrobného digitálneho modelu georeliéfu (DMR);

- inžinierskogeologické a geologické mapovanie;
- aktualizácia databázy a registra svahových deformácií v správe ŠGÚDŠ;
- príprava a tvorba parametrických máp, nevyhnutných pre vypracovanie prognózy zosuvného hazardu numerickými metódami v prostredí GIS;
- tvorba syntetickej mapy zosuvného hazardu, tematickej inžinierskogeologickej mapy a dokumentačnej mapy;
- vypracovanie záverečnej správy.

2.1 Tvorba podrobného digitálneho modelu georeliéfu (DMR)

Samotnému mapovaniu predchádza analýza povrchu georeliéfu v jednotlivých záujmových oblastiach. Je odvodená z podrobného DMR interpretovaného z diaľkového zamerania pomocou technológie leteckého laserového skenovania (LiDAR) s vysokým rozlíšením a detailným stupňom snímania. Táto technológia umožňuje získať obraz o povrchu georeliéfu aj v hustom lesnom poraste po jeho odfiltrovaní a predbežný prehľad o stave svahov aj v miestach, ktoré sú v teréne ťažšie a časovo náročnejšie dostupné.

Podrobný DMR je vyhotovený na základe počítačového spracovania surových dát získaných samotným leteckým laserovým skenovaním s hustotou 5 – 15 bodov na plochu 1 m^2. Získané surové dáta sú filtrované za účelom odstránenia rušivých a skresľujúcich prvkov: šumu, vegetačného porastu, budov a iných nežiaducich prírodných a antropogénnych prvkov, čoho výsledkom je čo najrelevantnejší spojitý obraz o priebehu georeliéfu so zachytením všetkých potrebných terénnych prvkov a útvarov. Odfiltrovaný DMR s vysokým rozlíšením (veľkosť pixelu pod 1 m) sa následne zobrazuje pomocou tzv. tieňovania reliéfu (hillshading) a uloží sa ako georeferencovaný obraz, ktorý slúži ako topografický mapový podklad pre terénnu rekognoskáciu a mapovanie. Mapu s tieňovaným reliéfom v rastrovej forme využívame pri zobrazení na displeji GNSS (Global Navigation Satellite System) zariadenia spolu s aktuálnou polohou geológa v teréne.

Nový digitálny model reliéfu DMR 5.0 zabezpečuje Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR) od roku 2017 s predpokladaným ukončením projektu v roku 2023. Územie SR je rozdelené na 42 lokalít (LOTov). Skenovanie prebieha postupne po jednotlivých LOToch od západu na východ. K 8. 5. 2022 je spracovaných 32 LOTov, čo predstavuje 79.72 % plochy SR (https://www.geoportal.sk/images/zbgis/lls/prehlad_lokalit_lls_na_poskytovanie.png – obr. 1).

2.2 Inžinierskogeologické a geologické mapovanie

Inžinierskogeologické a geologické mapovanie je zamerané na spresnenie pozície podložných (predkvartérnych hornín) a pokryvných útvarov (kvartérnych sedimentov) a svahových deformácií pomocou presného DMR a GNSS technológií,

Terénne práce začali v regióne Bielych Karpát, keďže digitálny model reliéfu (DMR 5.0) Trenčín (LOT 7bol k dispozícii už v roku 2019). Koncom roku 2019 boli publikované dáta z Myjavy (LOT 6), Banská Štiavnica (LOT 12) a Vtáčnika (LOT 13). V roku 2020 boli zverejnené podklady z Prievidze (LOT 14) a v roku 2021 Púchov (LOT 15), Kysuce (LOT 16) a Martin (LOT 18) a v roku 2022 Košice (LOT 35) a Slanec (LOT 36).

Každá z potenciálne vytypovaných zosuvných lokalít na základe analýzy bola overená pomocou GNSS prístroja triedy GIS (Geografické informačné systémy) a geodetickej triedy, so submetrovou presnosťou (v závislosti od tienenia signálu) a s možnosťou korekcie prostredníctvom „postprocessingu“ s vysokou polohovou a výškovou presnosťou a terénny záznam slúži ako podklad pre zakreslenie svahovej deformácie do aktualizovanej databázy registra svahových deformácií. V mobilných GNSS zariadeniach boli využívané rastrové vrstvy

vo formátoch Geotiff, MBtiles alebo Geopakage na orientáciu v teréne a vektorové vrstvy (Shapefile alebo Geopackage) na zaznamenávanie dokumentačných bodov. V prvej fáze boli na zaznamenávanie jednotlivých svahových deformácii využívané formuláre v tlačenej forme. V súčasnosti sú využívané možnosti aplikácií zaznamenávať jednotlivé položky priamo do GNSS zariadení. Na prácu v teréne sú využívané voľne dostupné aplikácie ako je QField alebo aj proprietárne ako Locus GIS. Aplikácia QField v súčasnosti umožňuje aj synchronizáciu a zber dát pomocou cloudu, pričom umožňuje prácu v online aj offline režime.

Meračské práce pozostávajú z polohopisného a výškopisného zamerania dôležitých geometrických prvkov mapovaných zosuvov, najmä odlučných hrán, resp. odlučno-transportačných oblastí, okrajov zosuvu, akumulačných oblastí a významných trhlín v telese zosuvu, bezodtokových depresií, atď. Podklad vo forme detailného DMR slúži aj na mapovanie geologických prvkov – litologických rozhraní so zameraním na pokryvné útvary, s hrúbkou pokryvu nad 0,5 m.

2.3 Aktualizácia databázy a registra svahových deformácií

Register svahových deformácií v podrobnej mierke sa buduje v prostredí centrálnej priestorovej databázy v dátovom úložisku v priestoroch ŠGÚDŠ v Bratislave. Prístup do databázy pre čítanie a vkladanie údajov je možný aj z regionálnych stredísk ŠGÚDŠ a z dočasných stanovíšť priamo počas terénneho mapovania. Súradnicovým systémom a kartografickým zobrazením GIS databázy je ETRS 89 / UTM (Universal Transverse Mercator) zone 34N (N-E) – EPSG: 3046 S-JTSK/Krovak East North (EPSG: 8353).

2.4 Príprava a tvorba parametrických máp

Parametrické mapy sú nevyhnutné pre vypracovanie prognózy zosuvného hazardu numerickými metódami v prostredí GIS.

V záujmovom území budú použité štyri základné vstupné parametre, ktoré majú najvýraznejší vplyv na vznik a vývoj svahových deformácií. Všetky hodnotené vstupné parametre budú znázornené formou parametrických (indexových) máp spracovaných v prostredí GIS (GRASS, QGIS) a priestorovej databázy (PostGIS):

- litológia (horninové prostredie);
- sklon svahu, prípadne dĺžka svahu;
- ročné priemerné úhrny zrážok;
- krajinná pokrývka.

2.5 Tvorba syntetickej mapy zosuvného hazardu

V mape budú vyčlenené rajóny (zóny) s podobnou stabilitou svahov, resp. podobnou náchylnosťou územia na rozvoj svahových pohybov. Farebne (“semaforovou“ metódou) bude rozlíšených päť stupňov zosuvného hazardu:

- veľmi nízky stupeň;
- nízky stupeň;
- stredný stupeň;
- vysoký stupeň;
- veľmi vysoký stupeň.

2.6 Tvorba účelovej inžinierskogeologickej mapy v mierke 1 : 10 000

Účelová inžinierskogeologická mapa v mierke 1 : 10 000je pri riešení uvedenej problematiky základným východiskovým podkladom. Zostavuje sa v zmysle Smernice MŽP SR č. 1/1996 – 3.2 na zostavenie inžinierskogeologických máp. V mape zobrazujeme:

- horninové prostredie – priestorové rozšírenie a litologické zloženie jednotlivých komplexov predkvartérneho podložia i kvartérneho pokryvu hrúbky > 1 m;

- tektonické porušenie územia – tektonické zlomy, línie, prešmyky;
- hydrologické a hydrogeologické pomery –vodné toky, prirodzené i umelé akumulácie (nádrže) povrchovej vody, zamokrené miesta, pramene;
- geodynamické javy – výskyt, rozsah a charakter rôznych typov svahových deformácií a prejavy erózie, seizmicita územia, neotektonicky aktívne zlomové línie;
- nebezpečenstvo prehradenia toku – vyznačené bude bodovou značkou v úseku toku, ktorý môže byť takto ohrozený;
- podrúbané územia – v pohorí Vtáčnik.

3. Aktuálne výsledky

V súčasnosti je geologická úloha v plnej fáze riešenia, takže v tomto príspevku prinášame len priebežné informácie získané počas troch rokov mapovacích prác na území Bielych Karpát. Vymapované a zakreslené do mapy litológie sú takmer všetky svahové deformácie, či už zaznamenané priamo v teréne alebo pomocou DMR 5.0. Na mapovanom území bolo zistených 2 574 svahových deformácií. V registri svahových deformácií sú zatiaľ spracované len svahové deformácie z oblasti Myjavy a Trenčína (LOT 6 a 7), z ktorých boli k dispozícii DMR 5.0 na začiatku riešenia úlohy. Ide o juhozápadnú časť Bielych Karpát, predstavujúcu 30 mapových listov ZM10. Hranicu tvorí údolie rieky Vláry od Nemšovej po Vlársky priesmyk.

3.1 Porovnanie vymapovaných svahových deformácii s výsledkami Atlasu máp stability svahov SR

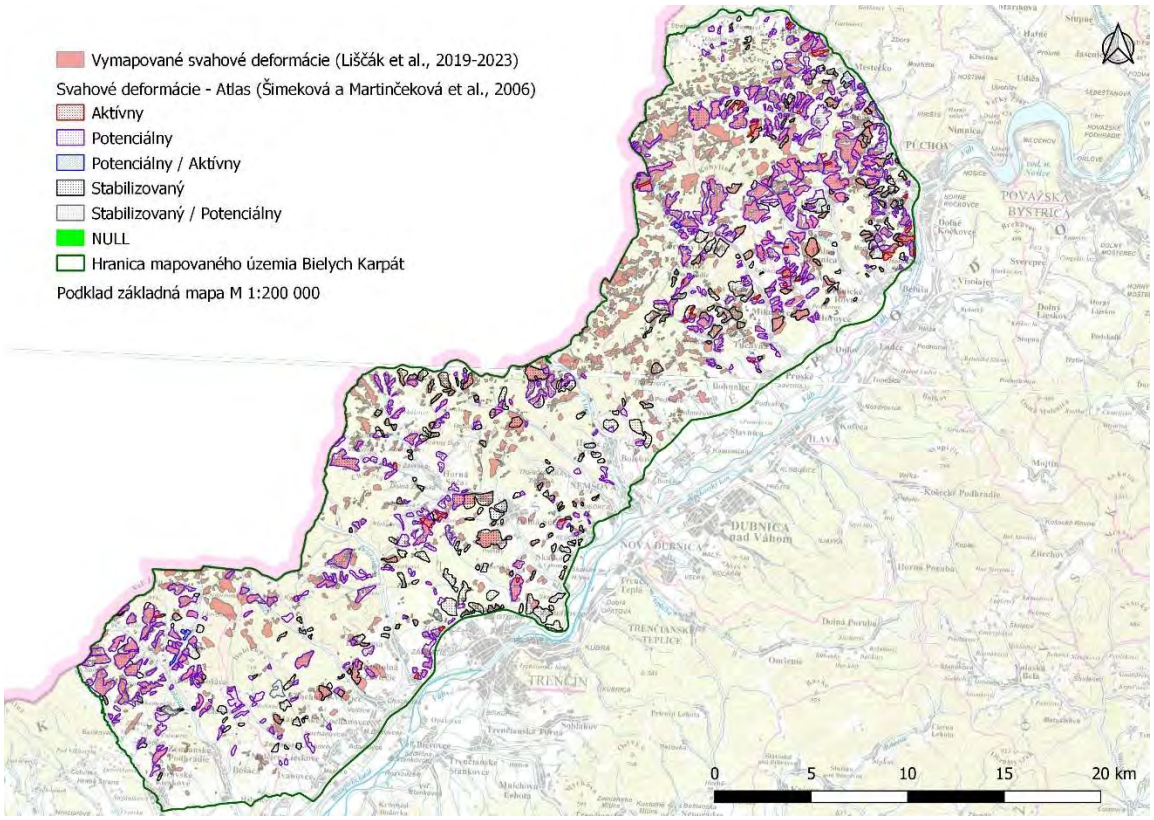
V Atlase máp stability svahov Slovenskej republiky v mierke 1 : 50 000 (Šimeková, Martinčeková a kol., 2006; ďalej „Atlas“) je na mapovanom území Bielych Karpát zaznamenaných 850 svahových deformácií s celkovou rozlohou 97,24 km^2.

K 8. 5. 2022 sme v území Bielych Karpát vymapovali 2 574 svahových deformácií z celkovou plochou 104,12 km^2. Porovnanie počtov vymapovaných svahových deformácií s Atlasom je uvedené v tab. 1. Na obr. 2 je porovnanie aktuálne vymapovaných svahových deformácií s Atlasom na podklade Základnej mapy M 1 : 200 000. Na obr. 3 je detailnejšie porovnanie na podklade DMR 5.0.

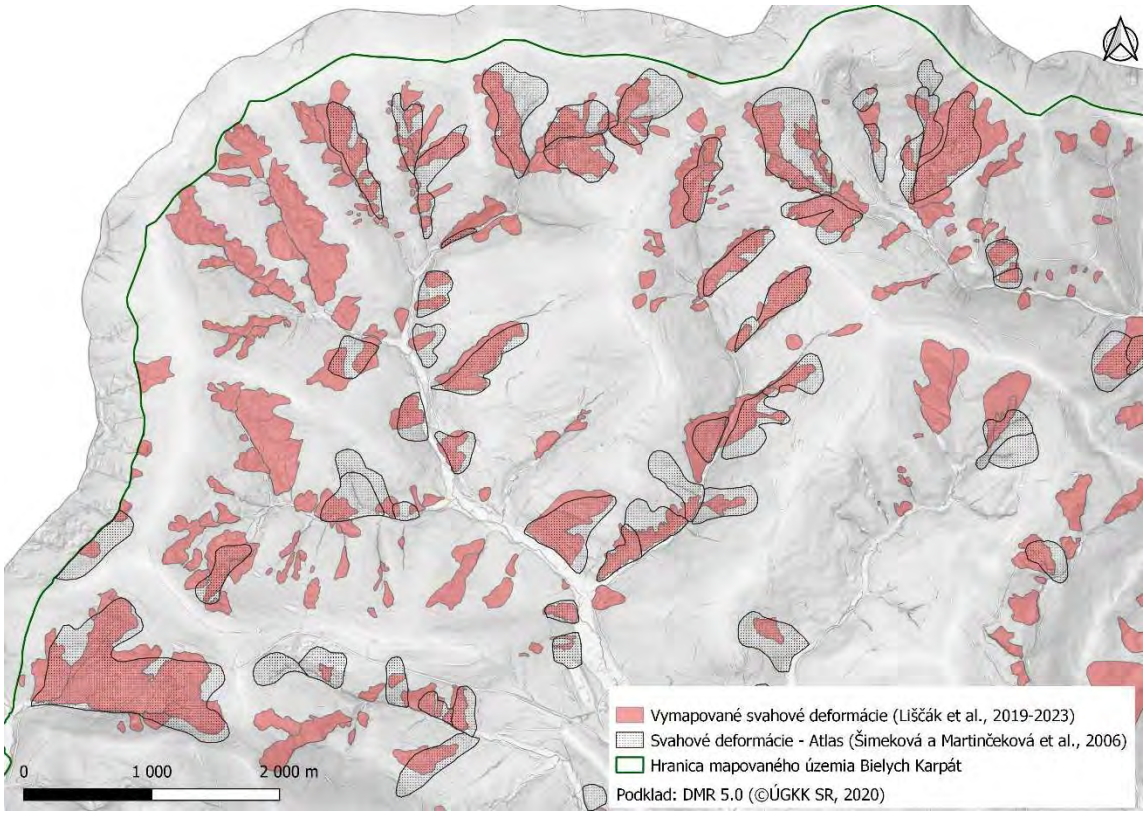
Tab. 1 Porovnanie vymapovaných svahových deformácií s Atlasom vo výreze na obr.7
Tab. 1 Comparison of currently mapped slope deformations with the Atlas on the area on Fig.7

	Atlas (Šimeková a Martinčenková, 2006)	Vymapované (Liščák a kol., 2023)
Počet	850	2 574
Plocha [km^2]	97,24	104,12

Z tab. 1 vyplýva, že na mapovanom území bol trojnásobný počet svahových deformácií oproti Atlasu. Rozdiel celkovej plochy svahových deformácií je oproti odchýlke v ich počte menej výrazný a predstavuje 6,6 %. Dôvodom je, že v rámci Atlasu boli jednotlivé svahové deformácie zakresľované do generalizovaného topografického podkladu, vďaka čomu boli plochy nadhodnotené. Podklad DMR 5.0 však umožňuje zakreslenie skutočných hraníc jednotlivých svahových deformácií. Vo viacerých prípadoch boli veľkoplošné deformácie rozdelené na menšie polygóny. Takisto zobrazenie vo väčších mierkach umožňuje zaznamenať aj svahové deformácie s minimálnou plochou, čo v Atlase nebolo možné. Ako vidieť na obr. 3 vďaka využitiu DMR bolo možné identifikovať aj svahové deformácie, ktoré boli predtým zakryté vegetáciou a v ťažko dostupnom či zalesnenom teréne.



Obr. 2: Aktuálne vymapované zosuvy na podklade ZM 200 000
Fig. 2: Currently mapped landslides visualised on BM 200,000



Obr. 3: Porovnanie aktuálne vymapovaných svahových deformácií s Atlasom máp stability svahov SR (Šimeková, Martinčeková a kol., 2006)
Fig. 3: Comparison of currently mapped slope deformations with the Atlas of slope stability maps of SR (Šimeková, Martinčeková a kol., 2006)

3.2 Štatistické zhodnotenie parametrov vymapovaných zosuvov

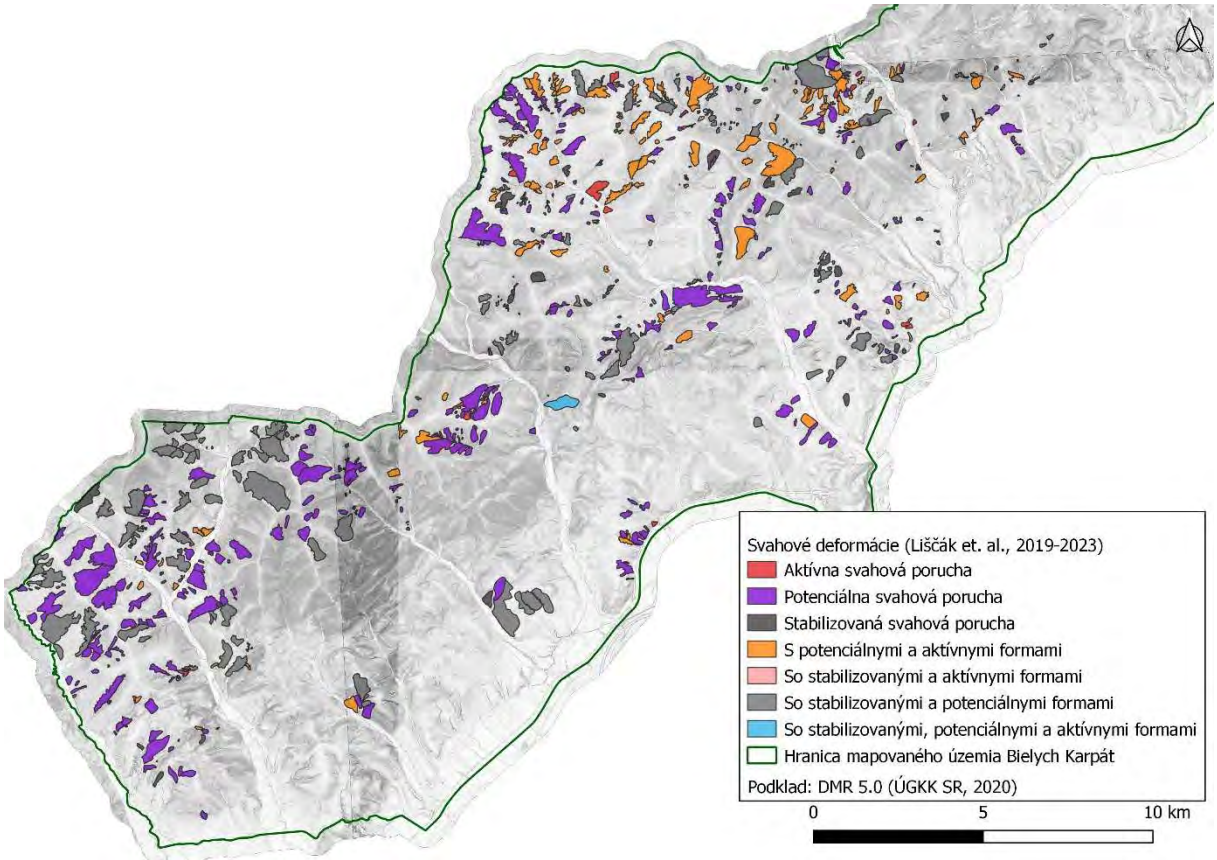
Z vymapovaných svahových deformácií je v registri svahových deformácií k 8. 5. 2022 spracovaných 874. V nasledujúcom štatistickom hodnotení sú využité práve údaje o týchto svahových deformáciách.

Rozdelenie svahových deformácií podľa typu je uvedené v tab. 2. Absolútnu väčšinu predstavujú zosuvy, resp. ich kombinácia so svahovými prúdmi, ktorých je 839. Zaznamenaných bolo aj 21 zemných prúdov, 3 mury a 3 blokové polia.

Na obr. 4 sú zobrazené svahové deformácie rozdelené podľa aktivity. Pri hodnotení aktivity prevládajú potenciálne svahové deformácie s počtom 442. Čisto aktívnych svahových deformácií je 36, svahových deformácií s potenciálnymi a aktívnymi formami 151 (tab. 3). Na obr. 5 je zaznamenaná aktívna svahová deformácia v obci Zubák.

Tab. 2 Porovnanie svahových deformácií podľa typu
Tab. 2 Comparison of slope deformations according their type

Typ svahovej deformácie	Počet	% z počtu	Plocha [km^2]	% z plochy
Blokové pole + zosuv	1	0,11	0,26	0,69
Zosuv + svahový prúd	2	0,23	0,02	0,05
Blokové pole	3	0,34	0,92	2,46
Hlinito-kamenitý prúd, mura.	3	0,34	0,03	0,08
Zosuv + blokové pole	5	0,57	0,76	2,02
Zemný prúd	21	2,40	0,16	0,44
Zosuv (všeobecne)	839	96,00	35,44	94,27



Obr. 4: Svahové deformácie v registri svahových deformácií podľa stupňa aktivity (Liščák a kol., 2023)
Fig. 4: Comparison of currently mapped slope deformations according to activity (Liščák a kol., 2023)

Tab. 3 Porovnanie svahových deformácií podľa aktivity
Tab. 3 Comparison of slope deformations according to activity

Aktivita	Počet	% z počtu	Plocha [km^2]	% z plochy
Svahová deformácia so stabilizovanými, potenciálnymi a aktívnymi formami	2	0,23	0,27	0,72
Svahová deformácia so stabilizovanými a aktívnymi formami	4	0,46	1,40	3,73
Aktívna svahová deformácia	36	4,12	1,45	3,87
Stabilizovaná svahová deformácia	58	6,64	1,21	3,23
Svahová deformácia s potenciálnymi a aktívnymi formami	151	17,28	6,16	16,38
Svahová deformácia so stabilizovanými a potenciálnymi formami	181	20,71	13,25	35,23
Potenciálna svahová deformácia	442	50,57	13,85	36,84

Obr. 5: Aktívna svahová deformácia v obci Zubák (foto P. Ondrus)
Fig. 5: Active slope deformation in Zubák Village (photo P. Ondrus)

Z hľadiska členitosti 467 (53,43 %) deformácií s plochou 8,18 km^2 (21,76 %) patrí k jednoduchým a 407 (46,57 %) s plochou 29,41 km^2 (78,24 %) k zloženým svahovým deformáciám.

V 424 prípadoch čelo deformácie zasahuje do vodného toku, k vodným tokom ani nádržiam nemá vzťah 440 svahových deformácií, zosúvanie brehu vodného toku sa vyskytlo deväťkrát a v 1 prípade ide o zosúvanie brehu vodnej nádrže (tab. 4). Hydrogeologické pomery sú zhodnotené v tab. 5.

Tab. 4 Porovnanie svahových deformácií podľa vzťahu k vodným tokom a nádržiam
Tab. 4 Comparison of slope deformations according to the relation to watercourses and reservoirs

Vzťah k vodným tokom a nádržiam	Počet	% z počtu	Plocha [km^2]	% z plochy
Zosúvanie brehu vodného toku	9	1,03	0,16	0,43
Čelo deformácie zasahuje do vodného toku	424	48,51	26,34	70,06
Zosúvanie brehu vodnej nádrže	1	0,11	0,01	0,02
Nemá vzťah k vodným tokom ani nádržiam	440	50,34	11,09	29,49

Tab. 5 Porovnanie svahových deformácií podľa hydrogeologických pomerov
Tab. 5 Comparison of slope deformations according to hydrogeological conditions

HG pomery	Počet	% z počtu	Plocha [km^2]	% z plochy
Údaje o HG pomeroch neznáme	126	14,42	3,66	9,73
Svah s výskytom prameňov a mokrín	301	34,44	20,24	53,84
Suchý svah	340	38,90	7,83	20,81
Svah s výskytom mokrín	107	12,24	5,87	15,62

Príčiny svahových deformácií sú 859 prípadoch prírodné, v jednom prípade boli zistené antropogénne príčiny a v 14 prípadoch ide o kombináciu prírodných a antropogénnych príčin.

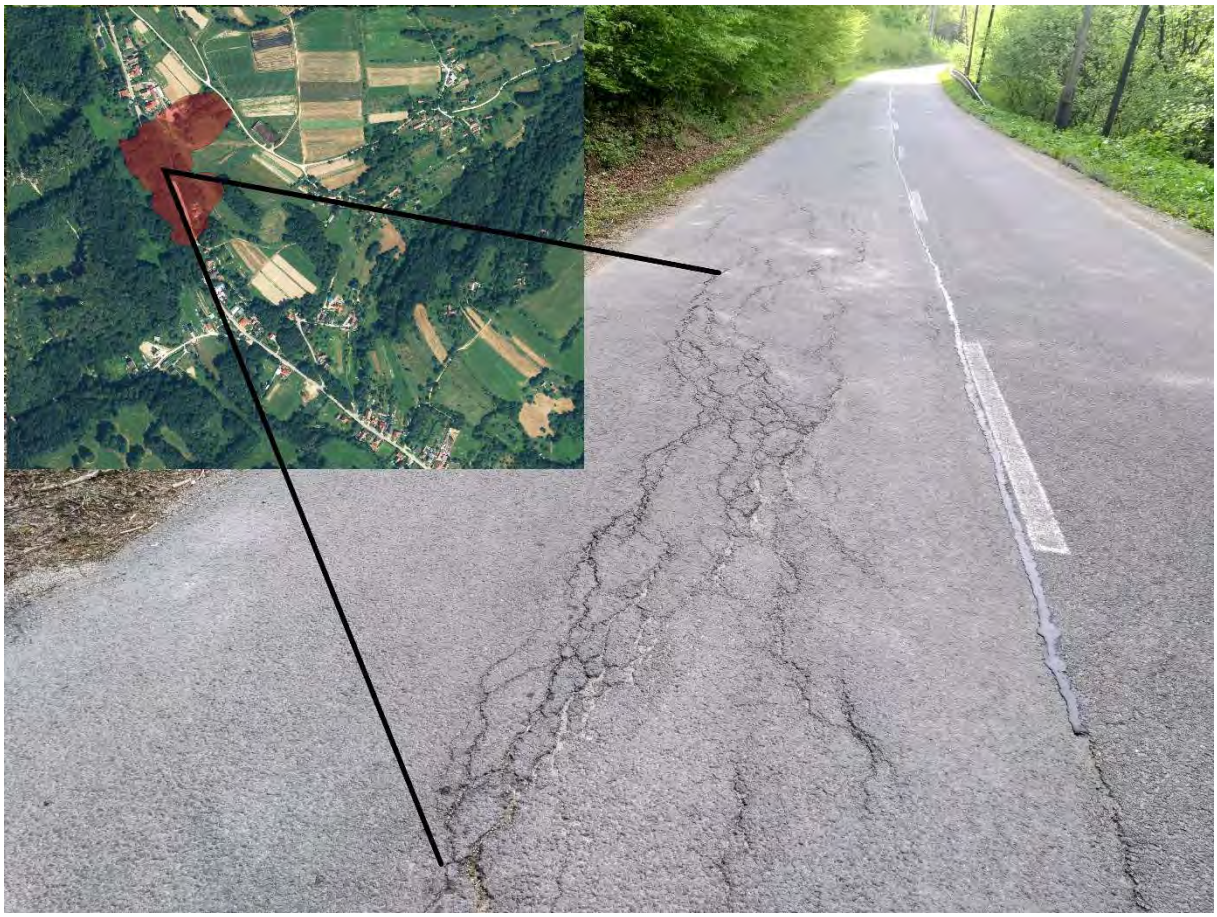
V tab. 6 je uvedené zhodnotenie zaregistrovaných svahových deformácií z hľadiska socioekonomickej významnosti, pričom boli zosuvy zaradené do 4 tried (Marzocchi a kol., 2009):

- malá významnosť (R1): marginálne sociálne, ekonomické a environmentálne škody;
- stredná (R2): malé poškodenie budov, infraštruktúry a životného prostredia. Žiadne podstatné vplyvy na obyvateľstvo, funkčnosť budov a ekonomické aktivity;
- vysoká (R3): obavy o bezpečnosť obyvateľstva. Potenciálne poruchy funkčnosti stavieb a infraštruktúry, možné prerušenie ekonomických aktivít a relevantné poškodenie životného prostredia. Na obr. 8 je príklad porušeného objektu v obci Horná Súča;
- veľmi vysoká (R4): očakávané škody vrátane obetí a zranení, vážne poškodenie budov a infraštruktúry, zničenie existujúceho stavu životného prostredia a socioekonomických aktivít.

Tab. 6 Rozdelenie svahových deformácií podľa (na základe?) socioekonomickej významnosti (podľa Marzocchi a kol., 2009)
Tab. 6 Comparison slope deformations according to socioeconomic significance (according to Marzocchi a kol., 2009)

Socioekonomická významnosť	Počet	% z počtu	Plocha [km^2]	% z plochy
R1 – malá	737	84,32	26,37	70,13
R2 – stredná	88	10,07	6,43	17,11
R3 – vysoká	35	4,00	2,79	7,43
R4 - veľmi vysoká	14	1,60	2,00	5,33

Zaznamenali sme aj ohrozenie 1370 budov 158 (12,43 %) svahovými deformáciami, 9 (0,70 %) svahových deformácií ohrozuje diaľnice a cesty I. triedy, 72 (4,27 %) ohrozuje cesty II. a III. triedy, 5 (0,53 %) železnice a 68 (6,47 %) elektrické vedenie. V 22 prípadoch svahových deformácií (2,44 %) sa vyskytlo aj porušenie budov, v 12 prípadoch (0,31 %) porušenie ciest a v 3 prípadoch (0,52 %) naklonenie stĺpov elektrického vedenia a v jednom prípade aj telefónneho vedenia. Príklad porušenia komunikácie trhlinami v katastri obce Horná Súča, časť Záhradky zobrazuje obr. 6.

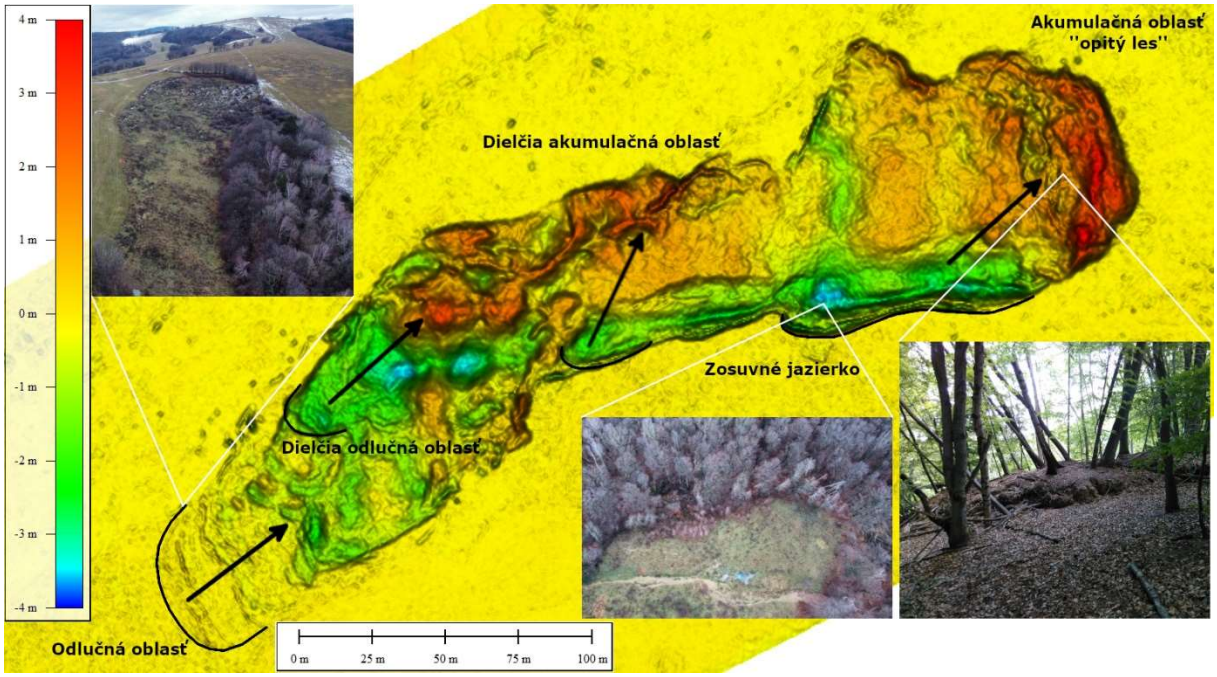


Obr. 6: Trhliny na ceste v akumulačnej časti zosuvu pri obci Horná Súča, časť Záhradky (foto P. Ondrus), b – Lokalizácia zosuvu (Podklad: Ortofotomozaika, © GKÚ, NLC, 2017)
Fig. 6: Cracks on the road in the accumulation part of the landslide near Horná Súča, part Záhradky (photo P. Ondrus), b – Localisation of the landslide (Ground: Orthophotomosaic, © GKÚ, NLC, 2017)

3.3. Využitie DMR 5.0 na monitorovanie zmien terénu v dôsledku aktívnych svahových deformácií

Na zvýraznenie zmien aktívneho zosuvu zmapovaného dňa 25. 5. 2020 pri vrchu Machnáč (kataster obce Drietoma) boli použité interpolované údaje dvoch rôznych digitálnych výškových modelov DMR 5.0 pomocou geometrickej analýzy. Prvým súborom údajov bol produkt ÚGKK SR z roku 2018. Druhý súbor realizovala v novembri 2021 firma Geotronics Slovakia, s. r. o. v spolupráci s Katedrou geodézie, Stavebnej fakulty, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Z dvoch digitálnych modelov povrchu v týchto dvoch rôznych časových obdobiach bola vytvorená rozdielová mapa (obr. 7). Na znázornenie zmien tvaru krajiny v dôsledku pohybu hmoty bolo použité farebné rozlíšenie na základe zmien nadmorskej výšky približne od 0,50 m. Žltá farba predstavuje oblasti s malou alebo žiadnou zmenou nadmorskej výšky. Úbytok hmoty je znázornený zelenými až modrými odtieňmi, zatiaľ čo

prírastok hmoty je zafarbený odtieňmi oranžovej a červenej. Týmto spôsobom sa nám podarilo úspešne identifikovať a zmapovať aktívne časti zosuvu. Oblasti s úbytkom hmoty (zelená) sú viditeľné pod hlavnou odlučnou hranou zosuvu a vedľajšou odlučnou hranou v spodnej časti zosuvu. Najvyššie poklesy nadmorskej výšky 3,5 m (modrá) boli zaznamenané v línii západo-východného smeru, ktorá pravdepodobne predstavuje zlomovú líniu. Naopak najvyššie prevýšenie o cca 4 m (červená) je vidieť pri čiastkovej akumulácii v strede zosuvu a v jeho čele.



Obr. 7: Rozdielová mapa zosuvu pod vrchom Machnáč
Fig. 7: Differential digital elevation model under Machnáč hill

5. Záver

V príspevku sú hodnotené výsledky stavu mapovania v oblasti Bielych Karpát v rámci geologickej úlohy Identifikácia, inventarizácia a inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií. Pri mapovaní bol použitý podrobný DMR zobrazený formou tieňovania reliéfu, ktorý je neoceniteľnou pomôckou pri určovaní presnej polohy jednotlivých svahových deformácií, ktoré sú s pomocou GNSS prístrojov overené v teréne, zdokumentované a následne presne zakreslené a zaznamenané do registra svahových deformácii v rámci databázy ŠGÚDŠ. Vďaka tejto technológii sme k dátumu 8. 5. 2022 vymapovali 2 574 svahových deformácií s celkovou plochou 104,12 m^2. Z porovnania LiDARových snímok vytvorených v rôznych časových obdobiach dokážeme vytvoriť rozdielovú mapu a zhodnotiť prejavy aktivity zaznamenané farebnou škálou podľa zmeny nadmorskej výšky.

Použitie technológie LiDAR a GNSS pomôcok sa stalo neodmysliteľnou súčasťou mapovania svahových deformácií a predstavuje ďalší krok vpred pri registrácii svahových deformácií s možnosťou ich prezentácie aj v mierke katastrálnej mapy. V porovnaní s identifikáciou zosuvov na podklade z leteckých ortofotosnímok, reliéf spracovaný z DMR umožňuje identifikovať priebeh svahových deformácií aj v teréne zakrytom vegetáciou a tiež možný výskyt ďalšieho postihnutia územia svahovými deformáciami v bližšom alebo širšom okolí výskytu javu.

Poďakovanie

Autori ďakujú Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky (ÚGKK SR) za spoluprácu pri dodávaní výsledkov LLS z lokalít, ktoré sa týkajú mapovaných území. Vďaka takisto patrí aj firme Geotronics Slovakia, s. r. o. za nalietanie okolia aktívneho zosuvu pod vrchom Machnáč v novembri 2021, čím nám umožnili získať podklady na vypracovanie rozdielovej mapy.

Zoznam literatúry

Liščák, P., Pauditš, P., Dananaj, I., Petro, Ľ., Iglárová, Ľ., Ondrášiková, B., Nagy, A., Šimon, L., Fraštia, M., 2018: Identifikácia, registrácia a inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií, orientačný prieskum, projekt geologickej úlohy, ŠGÚDŠ, 72 s.

Marzocchi, W., Mastellone, M. L., Di Ruocco, A, Novelli, P., Romeo, E. a Gasparini, P. 2009: Principles of multi-risk assessment. Interaction amongst natural and man-induced risks. EC, Directorate-General for Research, Environment Directorate.

Šimeková, J., Martinčeková, T., Abrahám, P., Gejdoš, T., Grenčíková, A., Grman, D., Hrašna, M., Jadroň, D., Záthurecký, A., Kotrčová, E., Liščák, P., Malgot, J., Masný, M., Mokrá, M., Petro, Ľ., Polaščinová, E., Solčiansky, R., Kopecký, M., Žabková, E., Wanieková, D., Baliak, F., Caudt, Ľ., Rusnák, M., Sluka, V., 2006: Atlas máp stability svahov SR M 1 : 50 000. INGEO-ighp, s.r.o., Žilina, 155 s.

MOŽNOSTI LOKALIZOVANIA POLOHY ŠMYKOVEJ PLOCHY

POSSIBILITIES OF LOCATING THE POSITION OF THE SLIP PLANE

Peter Turček[1], Monika Súľovská[2]

[1]*Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: peter.turcek@stuba.sk*
[2]*Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: monika.sulovska@stuba.sk*

Abstrakt: Lokalizácia šmykovej plochy zosuvu je základným predpokladom k príprave správneho návrhu sanačných opatrení. V zložitých situáciách je nevyhnutné potvrdiť viacero nezávislých postupov, ktorými sa vylúčia akékoľvek pochybnosti o zistených skutočnostiach. V príspevku sú opísané na seba nadväzujúce prieskumné aktivity, ktorými sa spresňovali prvotné informácie. Okrem vyhodnocovania inklinometrických vrtov sa aplikovala statická a dynamická penetrácia, elektrická odporová tomografia, odber vzoriek zemín z obnaženej šmykovej plochy a ich testovanie. K návrhu a realizácii sanácie porušeného násypu sa pristúpilo až po komplexnom zhodnotení podkladov.

Abstract: The location of the landslide slip plane is a basic prerequisite for the preparation of the correct design of remediation measures. In difficult situations, it is necessary to confirm a number of independent procedures to avoid any doubts about the determined findings. The paper describes consecutive investigation activities that refined the initial information. In addition to the evaluation of inclinometric boreholes, static and dynamic penetration, electrical resistivity tomography, soil sampling from exposed slip plane and their testing were applied. Only after a comprehensive evaluation of the obtained data the design and implementation of the remediation of the damaged embankment was started.

Kľúčové slová: šmyková plocha, inklinometer, statická a dynamická penetrácia, elektrická odporová tomografia, laboratórne skúšky.

Key words: slip plane, inclinometer, static and dynamic penetration, electrical resistivity tomography, laboratory testing.

1. Úvod

Krátko pred dokončením rýchlostnej komunikácie situovanej na severovýchodnom Slovensku došlo k porušeniu násypového telesa. Potrebné bolo zastaviť rýchlo sa rozvíjajúcu poruchu. Objednávateľ bol presvedčený, že sa jednalo o nedodržanie technologického postupu výstavby zhotoviteľom a želal si potvrdiť tento predpoklad. Požiadavka expertov na aplikovanie prieskumných metód overujúcich skutočné príčiny poruchy narážala na neochotu konfrontácie s vopred stanovenou diagnózou. Na vylúčenie prípadnej neistoty záverov expertízy bolo vyžadované potvrdiť zistené skutočnosti nezávislými metódami. Presadenie viacerých terénnych prieskumných postupov muselo prekonať zložité vzťahy medzi účastníkmi výstavby. Spôsobilo to síce podstatné predĺženie prác, ale napokon to vyústilo do nenapadnuteľného výsledného hodnotenia problematickej stavby.

2. Terénne prieskumné práce

Rýchlostná komunikácia bola osadená do terénu, tvorenom deluviálnymi ílmi, sutinami a rozloženými ílovcami belovežského súvrstvia (paleocén – eocén) flyšového pásma s nepravidelne sa meniacimi hrúbkami vrstiev. Trasa na úpätí svahov miestami prechádzala cez potenciálne zosuvy, identifikované inžinierskogeologickým prieskumom (Cuninka, 2003). Vo vzdialenosti približne 70 m od osi cesty sa nachádzal prieskumný vrt, v ktorom dosahovala hrúbka deluviálnych ílov 10,1 m; zistené šmykové parametre sú zhrnuté v tab. 1.

Tab. 1 Parametre šmykovej pevnosti deluviálnych ílov podľa inžinierskogeologického prieskumu
Tab. 1 Shear strength parameters of deluvial clays according to engineering geological investigation

šmyková pevnosť	uhol vnútorného trenia φ (°)		súdržnosť c (kPa)	
	rozptyl	priemer	rozptyl	priemer
totálna šmyková pevnosť	3,5 – 8,5	6,2	49 – 74	58
efektívna šmyková pevnosť	14,7 – 26,3	23,1	0 – 30	9
reziduálna šmyková pevnosť	15,5 – 23,0	18,9	0 – 10	0 – 4

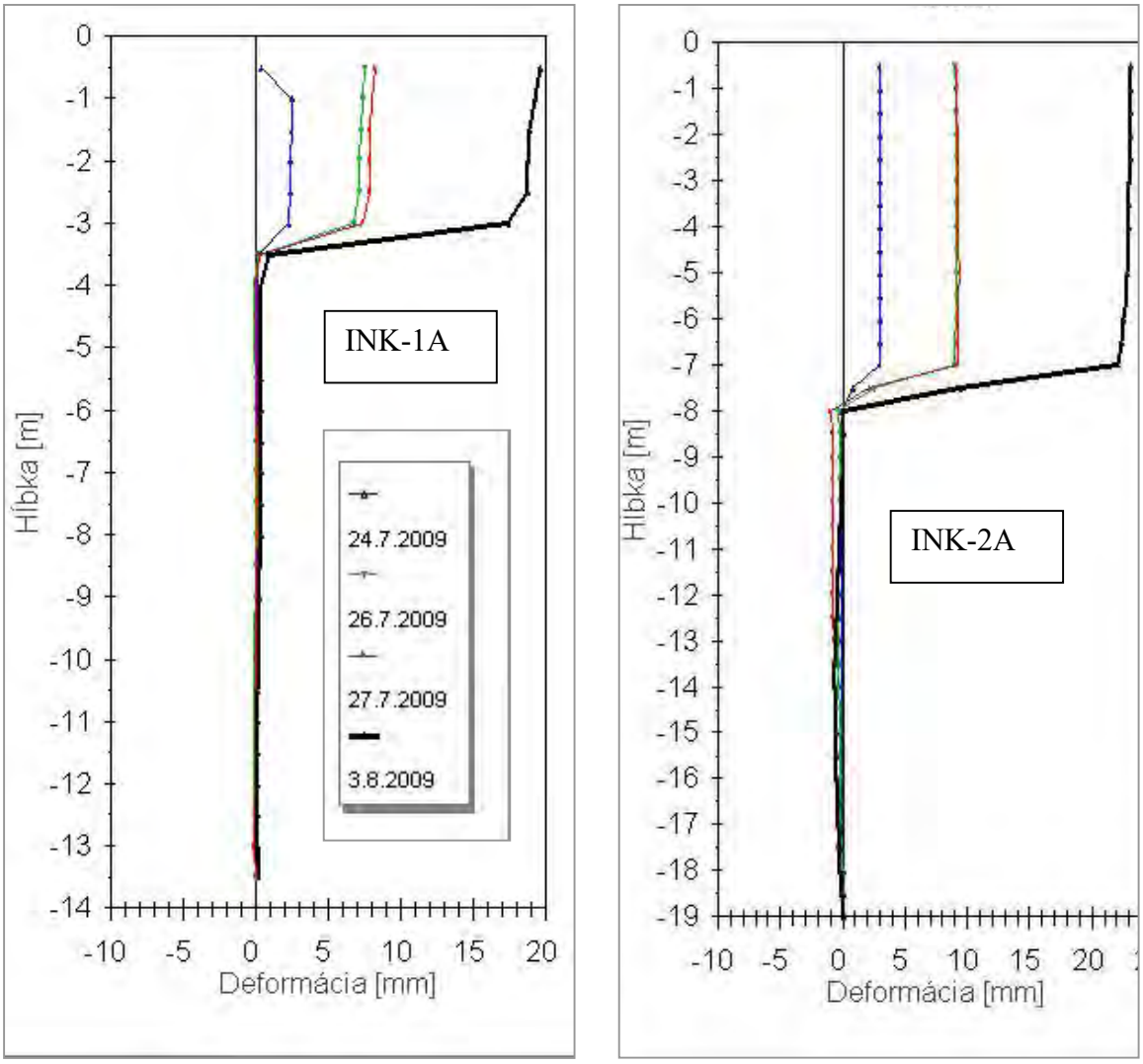
V paleogénnom podloží prevládajú ílovce nad tenko vrstevnatými pieskovcami. Nachádzajú sa pod povrchovými kvartérnymi útvarmi v hĺbke 2 až 7 m pod terénom, sú slabo vápnité a majú pevnú až tvrdú konzistenciu. Vo vrchnej vrstve sú ílovce silne zvetrané až rozložené. V miestach pod násypovým telesom sa podľa indícií inžinierskogeologického prieskumu približovala predpokladaná oslabená zóna k povrchu terénu. Nebolo pritom vylúčené riziko vytvárania šmykových plôch na kontakte aluviálneho štrku s paleogénnym ílovcom rozloženým na íl s úlomkami kamenitej sutiny.

Aktivita svahových pohybov bola sledovaná vo svahu ešte pred začiatkom výstavby inklinometrami, rozmiestnenými nad aj pod budúcim násypovým telesom. Budovanie násypu ovplyvnilo stav napätosti a režim podzemných vôd v dotknutom priestore. Po začatí stavebných prác sa postupne aktivizovali svahové pohyby, ktoré v dotknutej oblasti znefunkčnili niektoré inklinometre. Namiesto nich sa zabudovali nové, ktoré potvrdili pôvodne zistenú polohu šmykovej plochy. Dôsledne sa tiež sledoval časový vývoj deformácií.

Najintenzívnejší pohyb bol zaznamenaný v podloží násypového telesa. Ako príklad jednoznačného stanovenia šmykovej plochy v hĺbke 7 – 8 m pod hlavou pažnice bol inklinometrický vrt INK-2A, situovaný na lavičke násypu. Približne po dvoch mesiacoch došlo k jeho ustrihnutiu v hĺbke 2 m pod pôvodným povrchom terénu (po prepočítaní v hĺbke 7,5 m od pažnice umiestnenej na lavičke násypového telesa). Vo vrte INK-1A umiestnenom pri päte cestného násypu namiesto pôvodného zničeného inklinometrického vrtu bola zistená šmyková plocha v hĺbke 3,5 m pod hlavou pažnice, t.j. 2,3 m pod terénom. Vývoj deformácií jednoznačne indikujúcich šmykové plochy ostrým posunom v týchto inklinometroch je znázornený na obr. 1.

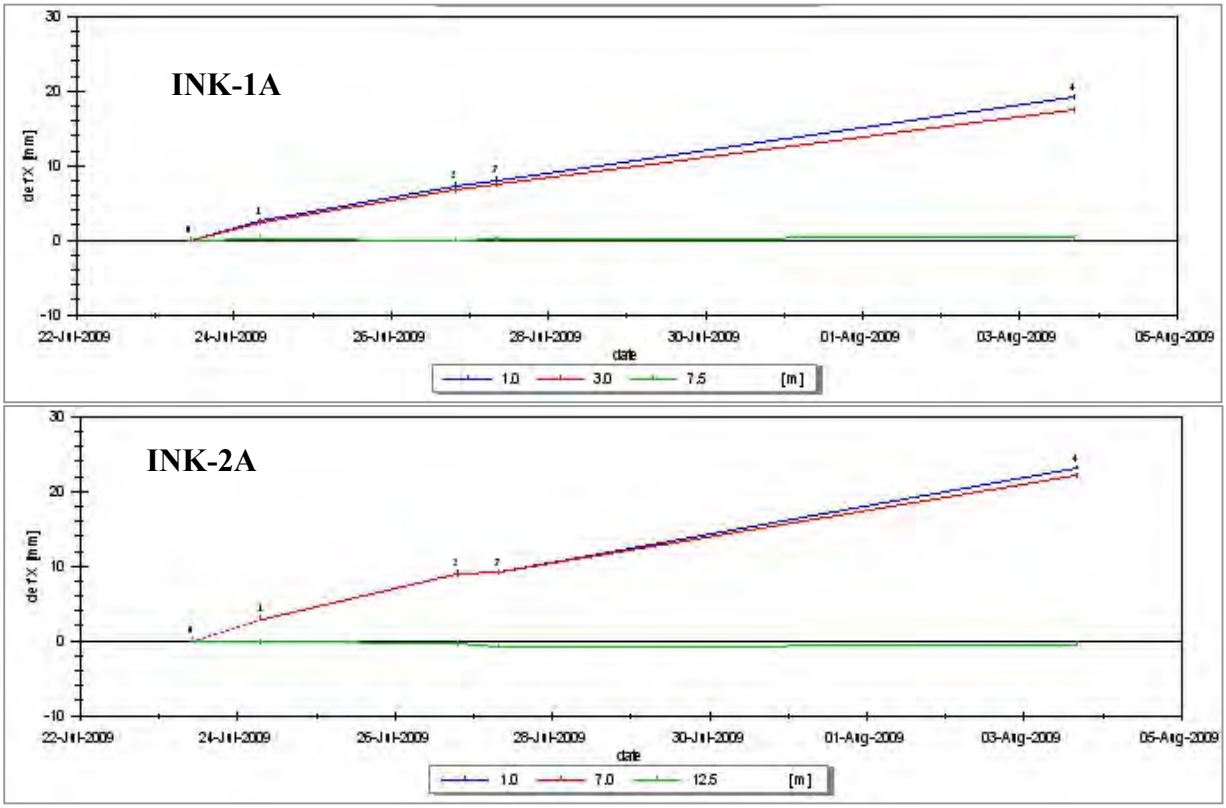
Obidva tieto neskôr zabudované inklinometrické vrty sa nachádzajú v najviac postihnutom priečnom profile násypového telesa. Zaujímavé bolo vyhodnotenie rýchlosti pohybu v uvedených inklinometrických vrtoch. Ukázalo sa, že pohyby prebiehali v konštantnej hĺbke prakticky rovnomernou rýchlosťou (pozri obr. 2). Ohraničenie dosahu šmykovej plochy v smere proti svahu umožnil inklinometrický vrt INK-3, situovaný vo svahu blízko nad telesom násypu. V sledovanom období neboli v tomto pozorovacom objekte zistené žiadne pohyby, čo umožnilo stanoviť dosah šmykovej plochy.

Správne umiestnenie inklinometrických vrtov do rizikovej oblasti dáva príležitosť veľmi presne určiť priebeh šmykovej plochy. V danom prípade boli už v prípravných fázach projektovania citlivo zvažované riziká vyplývajúce z podrezania potenciálne nestabilného svahu líniovou stavbou, ktoré viedli k správnemu rozmiestneniu monitorovacích zariadení.

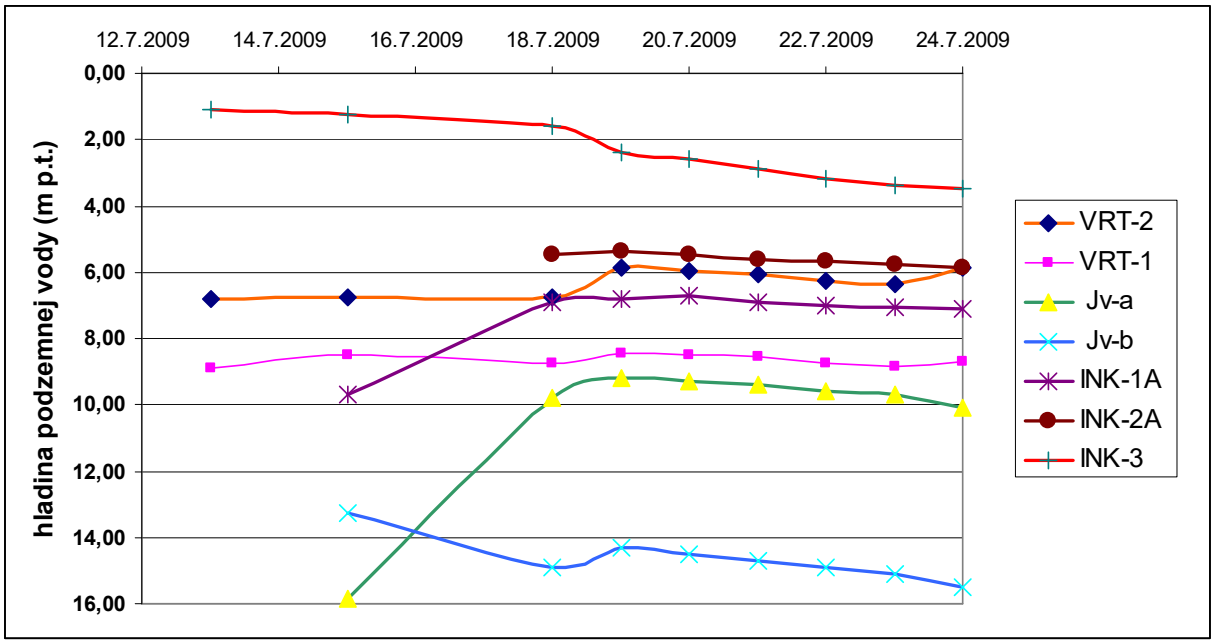


Obr. 1 Integrovaný priebeh podpovrchových deformácií v inklinometrických vrtoch INK-1A a INK-2A (podľa Grófa, 2009)
Fig. 1 Integrated course of subsurface deformations in inclinometric boreholes INK-1A and INK-2A (according to Gróf, 2009)

V zosuvných oblastiach je dôležité sledovanie hydrogeologických pomerov, ktoré obvykle súvisia s aktivitou svahových pohybov. K dispozícii boli len hladiny podzemnej vody počas zhotovovania prieskumných vrtov (Cuninka, 2003). Krátko pred vznikom poruchy bolo relatívne suché počasie, ktoré ovplyvnilo režim prúdenia podzemnej vody. Prehľad kolísania HPV v prieskumných vrtoch so zabudovanými piezometrami, ktoré sa nachádzali v blízkosti poruchy násypového telesa, je znázornený na obr. 3. Analýza na obr. 3 potvrdzuje komplikované prúdenie podzemnej vody v oblasti násypu s viacerými úrovňami hladín podzemných vôd. Dôvodom je nepravidelné striedanie nepriepustných zemín s málo priepustnými kolektormi. Tlakový charakter bol zistený napr. vo vrte INK-3, kde bola narazená HPV v hĺbke 3,0 m p.t. a v krátkom čase vystúpila až na 1,2 m p.t. Jednalo sa pravdepodobne o prirodzený prítok podzemnej vody zo svahu do oblasti násypu. V kopanej sonde umiestnenej do porušeného telesa násypu boli zistené prítoky podzemnej vody na báze násypu. Okrem toho sa objavili pramene pri päte násypu v smere po spádnici. Podzemná voda využívala najmä priepustnú bazálnu vrstvu násypu tvorenú zaílovaným lomovým kameňom. Bolo zistené, že zdrojom napájania tejto vrstvy bola voda pritekajúca z vyšších polôh svahu, ale aj z porušených drenážnych prvkov komunikácie (Turček a kol., 2009).



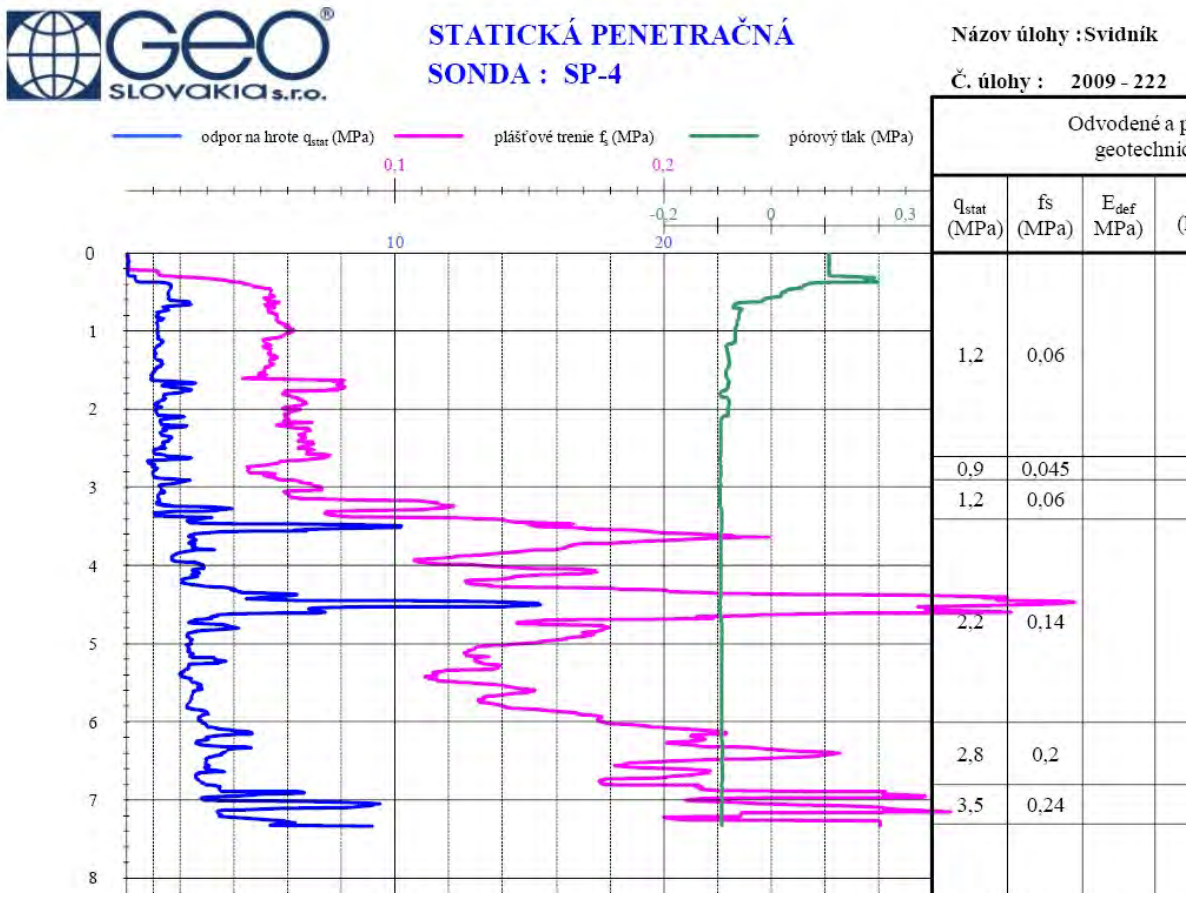
Obr. 2 Časový vývoj pohybov v inklinometrických vrtoch INK-1A a INK-2A
Fig. 2 Time evolution of movements in INK-1A and INK-2A inclinometer boreholes



Obr. 3 Kolísanie hladiny podzemnej vody v pozorovacích vrtoch v období 13. – 24. 7. 2009
Fig. 3 Groundwater level fluctuations in observation wells in the period 13. - 24. 7. 2009

V dotknutom priestore sa tiež uskutočnilo 7 statických penetračných skúšok (Potančok, 2009). Rozmiestnené boli do dvoch profilov v tesnej blízkosti porušeného násypu, takmer kolmo k osi rýchlostnej cesty. Cieľom bolo overenie kvality podložia. Ako príklad môže na obr. 4 slúžiť sonda SP-4, kde boli do hĺbky 3,0 m zistené nízke odpory na hrote sondy a zároveň nízke plášťové trenie. Popri tom boli do hĺbky 2,2 m zistené zvýšené pórové tlaky.

Prakticky rovnaké výsledky boli získané z ďalších statických penetračných sond. Výsledky statickej penetrácie po doplnení k vyhodnoteným inklinometrickým profilom umožnili potvrdiť polohu šmykovej plochy.

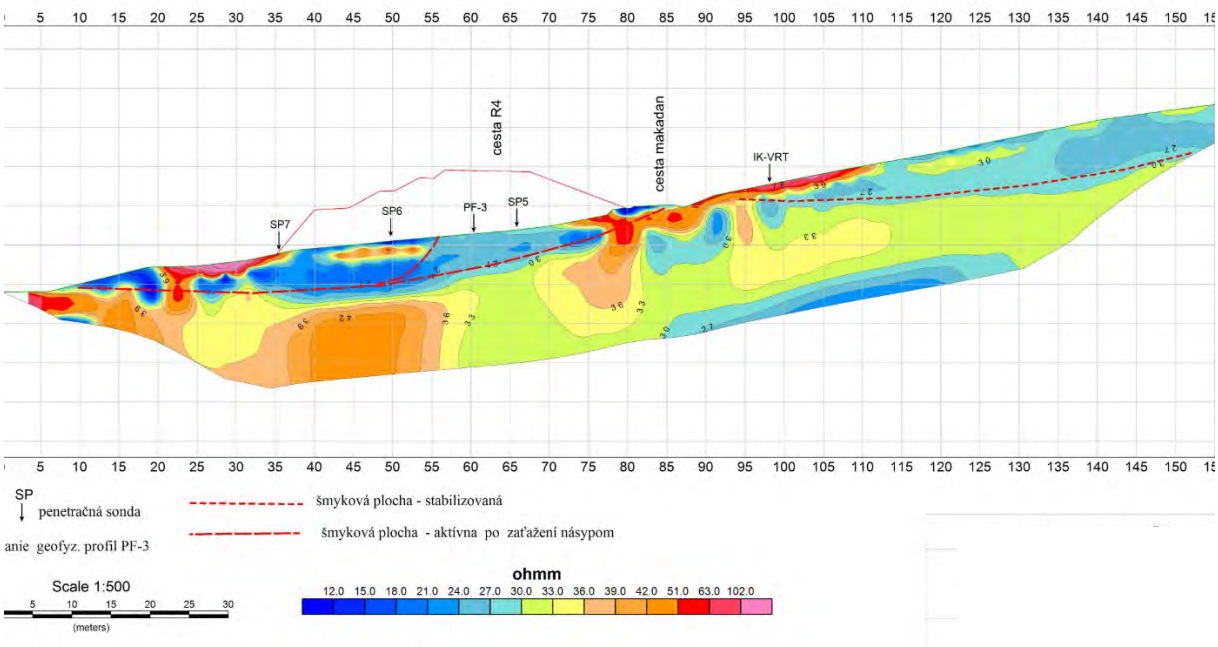


Obr. 4 Vyhodnotenie statickej penetračnej sondy SP-4 (Potančok, 2009)
Fig. 4 Evaluation of static penetration test SP-4 (Potančok, 2009)

Všetky vyššie uvedené terénne práce boli napokon doplnené odporovou tomografiou. Jej aplikácia je síce menej frekventovaná, ponúka ale pomerne názorne identifikovať vrstvy s výrazne odlišnou tuhosťou podložia. Interpretácia tvaru a polohy šmykovej plochy z vyhodnotenia elektrickej odporovej tomografie na obr. 5 sa zhoduje s výsledkami predchádzajúcich terénnych skúšok.

Počas rozoberania násypu boli ešte vo dvoch profiloch uskutočnené firmou GEO Slovakia, s.r.o. dynamické penetračné sondy. Pre potreby analýzy stability svahu bolo možné tieto sondy čiastočne využiť. Pozornosť sa venovala predovšetkým sondám siahajúcim do podložia, ktoré sa nachádzali v strednej časti pod telesom porušeného násypu. V tab. 2 je uvedená hrúbka mäkkých jemnozrnných zemín, ktorá začínala ihneď od povrchu pôvodného terénu. Celková hrúbka mäkkej polohy je súčtom priemernej hrúbky v danom profile a hodnoty, ako hlboko bola situovaná penetračná sonda pod pôvodným povrchom terénu. Z analýzy penetračných sond vyplývalo, že kĺzna plocha nebola v zisťovaných polohách ostro ohraničená, ale sa jednalo o prehnietenú zónu, ktorej hrúbka sa lokálne menila.

Dôvodom aplikovania neobvyklého rozsahu terénnych prác počas spracovávania úlohy boli objednávateľom vznášané parciálne námietky zamerané na „nedostatočné“ garantovanie identifikovanej šmykovej plochy.



Obr. 5 Elektrická odporová tomografia v mieste porušeného násypu
Fig. 5 Electric resistivity tomography at the site of the broken embankment

Tab. 2 Hrúbka mäkkej polohy v rastlom teréne pod násypom
Tab. 2 The thickness of the soft position in the original terrain below the embankment

sonda číslo	hrúbka mäkkej polohy (m)	priemerná hrúbka mäkkej polohy (m)	celková hrúbka mäkkej polohy (m)
SP-2	2,0	2,1	3,5
SP-3	2,2		
SP-5	1,2	1,7	2,5
SP-6	2,3		

3. Komplexné zhodnotenie

Paralelne s terénnymi prácami sa uskutočnili kontrolné výpočty stability svahu s reálne zhotoveným násypovým telesom spolu s jeho podložím (Turček a kol., 2009). Úloha bola rozčlenená na dve základné časti:

- Zhodnotenie projektového riešenia. Ako vstupy do výpočtu boli zadávané predpokladané vlastnosti podložia podľa inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu vykonaného pred začiatkom projektovania a navrhnuté vlastnosti násypového telesa.
- Posúdenie stability skutočne zhotoveného násypu s okrajovými podmienkami skutočne zistenými v teréne.

Metódou spätnej analýzy sa hľadali rozdiely v parametroch šmykovej pevnosti jednotlivých vrstiev podložia alebo telesa násypu, ktoré boli konfrontované s reálne zistenými skutočnosťami zistenými z terénnych prieskumov.

Pre každú ucelenú časť bol vytvorený samostatný geotechnický model, ktorý sa opieral o podklady, aplikovateľné pre príslušnú riešenú oblasť. V každom výpočte sa v prvom kroku určovala stabilita násypu a podložia bez účinkov podzemnej vody. Následne sa zohľadnil vplyv účinku hladiny podzemnej vody na kontakte telesa násypu s podložím. Projektové riešenie bolo hodnotené parametrickou štúdiou, do ktorej vstupovali vlastnosti šmykovej pevnosti z podkladov ktoré boli dostupné projektantovi (od efektívnych vrcholových až po

reziduálne parametre šmykovej pevnosti zosuvného delúvia), hladina podzemnej vody známa z prieskumu a násyp bez zaťaženia a so zaťažením dopravou.

Do výpočtového modelu zhotoveného násypu sa použilo presné zameranie tvaru násypu, výsledky laboratórnych skúšok vzoriek zemín, ktoré boli zistené po poruche a poloha šmykovej plochy z inklinometrického merania. V dodatočne zhotovenej prieskumnej sonde boli z priestoru klznej plochy odobraté dve vzorky ílovitej zeminy a v laboratóriu stanovené tieto parametre šmykovej pevnosti:

vzorka 1: $\varphi' = 19{,}5°$; $c' = 17$ kPa; $\varphi_u = 14{,}5°$; $c_u = 23$ kPa;

vzorka 2: $\varphi' = 20{,}7°$; $c' = 6$ kPa; $\varphi_u = 12{,}4°$; $c_u = 12$ kPa.

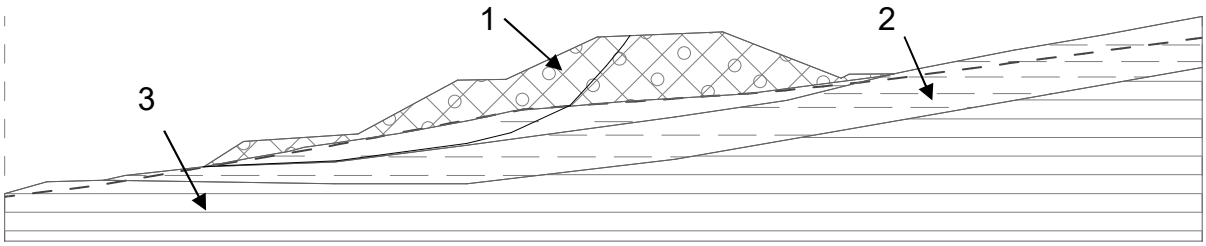
Zistenej tenkej polohe zosuvného deluviálneho ílu boli priradené reziduálne hodnoty parametrov šmykovej pevnosti. Priemerná hodnota reziduálneho uhla vnútorného trenia získaná z laboratórnych skúšok bola $\varphi_r = 13{,}5°$. V prípade aktívneho pohybu sa obvykle zadáva $c_r = 0$ kPa. Ukážka polygonálnej šmykovej plochy (identifikovanej z terénnych zistení) je na obr. 6. Zostavené boli dve výpočtové alternatívy:

- alternatíva 1: $c_r = 0$ kPa v tenkej vrstve zosuvného delúvia na kontakte násypu a podložia;
- alternatíva 2: $c_r = 5$ kPa; určená ako priemerná reziduálna hodnota súdržnosti získaná z výsledkov laboratórnych skúšok zosuvných deluviálnych ílov; uvažovala sa pre identickú vrstvu ílu ako v prvej alternatíve.

V oboch prípadoch sa modeloval svah ako odvodnený, ale aj s uvažovanou hladinou podzemnej vody (zistenou z terénnych meraní). Výsledky tohto modelovania sú v tab. 3.

Tab. 3 Výsledky posúdenia stability zhotoveného násypu
Tab. 3 Results of the stability assessment of the completed embankment

Alternatíva	metóda posúdenia stability násypu	kritická šmyková plocha	stupeň spoľahlivosti	
			bez vplyvu HPV	s uvažovaním HPV
1. (c = 0 kPa)	Petterson	kruhová	0,99	0,87
	Sarma	polygonálna	1,05	0,89
2. (c = 5 kPa)	Petterson	kruhová	1,14	1,12
	Sarma	polygonálna	1,26	1,04



Obr. 6 Identifikovaná polygonálna šmyková plocha (1 – násyp; 2 – deluviálny íl; 3 – ílovec)
Fig. 6 Identified polygonal slip plane (1 – embankment; 2 – deluvial clay; 3 – claystone)

Tvar a rozsah vygenerovanej šmykovej plochy potvrdili, že porucha nastala v podloží násypového telesa a nie v dôsledku nekvalitného zhotovenia zemného telesa. Napriek presvedčivej zhode všetkých aplikovaných spôsobov skúmania bol ešte investorom vyžiadaný priamy dôkaz polohy šmykovej plochy v podobe odkrytia podložia. Z priestoru obnaženej šmykovej plochy, ktorej poloha potvrdila predchádzajúce výsledky, boli odobraté vzorky rozloženého paleogénneho ílovca charakteru ílu vysokej plasticity, na ktorých sa tiež stanovili parametre šmykovej pevnosti, ktoré sa prakticky zhodovali s predchádzajúcimi výsledkami.

Obr. 7 Odkrytá šmyková plocha
Fig. 7 Exposed slip plane

4. Záver

Podrobnou analýzou všetkých terénnych metód overovania, doplnených laboratórnymi skúškami a následne potvrdenými stabilitnými výpočtami bolo preukázané, že rozhodujúcou príčinou poruchy bolo nestabilné podložie násypu, ktoré si vyžadovalo technické opatrenia na zabezpečenie spoľahlivej funkcie. Toto podložie bolo počas stavby sýtené vodou zo zárezu, prípadne z okolitých svahov, nezachytenou drenážnymi prvkami. Po akceptovaní výsledného hodnotenia s prikročilo k návrhu a realizácii sanácie.

Zoznam literatúry

Cuninka, M. 2003: Záverečná správa z inžinierskogeologického prieskumu. I/73/R4 Svidník, preložka cesty. Doplňujúci prieskum, Dopravoprojekt, a.s. Bratislava, stredisko Prešov, 08/2003.
Gróf, V., 2009: Inklinometrické meranie podpovrchových deformácií. R4 Svidník obchvat. GeoExperts, Žilina, 07/2009, 10 s.
Potančok, L., 2009: Statické penetračné skúšky Svidník R4 – obchvat. GEO Slovakia, s.r.o. Košice, 11/2009.
Turček, P., Ravinger, R., Súľovská, M., Kopecký, M., 2009: Expertízne posúdenie havárie násypu na stavbe rýchlostnej cesty R4 Svidník obchvat. SvF STU, 2009, 56 s.Záverečná správa – laboratórne rozbory zemín. Svidník R4 – zosuv cesty. GEO Slovakia, s.r.o. Košice, 07/2009.

DRUHÁ GENERÁCIA EUROKÓDOV A VLASTNOSTI HORNINOVÉHO PROSTREDIA

SECOND GENERATION OF EUROCODES AND GROUND PROPERTIES

Jana Frankovská

[1]*Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: jana.frankovska@stuba.sk*

Abstrakt: Eurokód 7 je určený na použitie v spojení s EN 1990, ktorá stanovuje zásady a požiadavky na bezpečnosť, použiteľnosť, robustnosť a trvanlivosť konštrukcií vrátane geotechnických konštrukcií a iných stavebných prác. V EN 1997 sú uvedené požiadavky a odporúčania na určovanie vlastností horninového prostredia pre návrh a overenie geotechnických konštrukcií. EN 1997-1: *Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Všeobecné pravidlá* definuje hodnoty geotechnických vlastností, používané pri návrhu geotechnických konštrukcií, t. j. reprezentatívne, návrhové, odvodené, nominálne a charakteristické hodnoty. EN 1997-2: *Vlastnosti horninového prostredia* poskytuje návod na výber metód terénneho prieskumu a laboratórnych skúšobných metód na získanie nameraných a odvodených hodnôt vlastností hornín z prieskumov. EN 1997-3: *Geotechnické konštrukcie* špecifikuje, ako sa majú určovať reprezentatívne a návrhové hodnoty geotechnických vlastností a ako sa majú používať pri navrhovaní geotechnických konštrukcií. Zároveň stanovuje pre jednotlivé geotechnické konštrukcie požiadavky na minimálny prieskum.

Abstract: Eurocode 7 is intended to be used in conjunction with EN 1990, which establishes principles and requirements for the safety, serviceability, robustness, and durability of structures, including geotechnical structures, and other construction works. EN 1997-2 provides requirements and recommendations for determining ground properties for the design and verification of geotechnical structures. EN 1997-1: *General rules* provides definitions for the different ground property values used in geotechnical design and the principles for obtaining representative and design values of ground properties from derived values via nominal and characteristic values, while EN 1997-2: *Ground properties*, gives guidance on the selection of field investigation and laboratory test methods to obtain measured and derived values of ground properties from field investigations. EN 1997-3: *Geotechnical structures* specifies how the representative and design ground property values shall be evaluated and used in geotechnical design verifications.

Kľúčové slová: eurokódy, prieskum a skúšanie horninového prostredia, geotechnické vlastnosti, model horninového prostredia

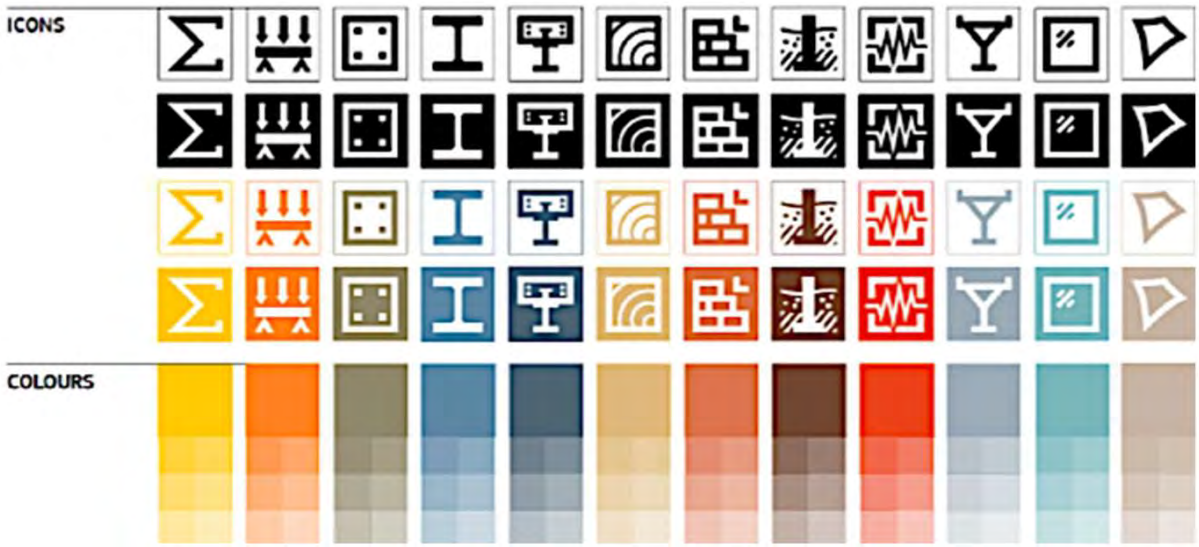
Key words: Eurocodes, ground investigation and testing, ground properties, ground model

1. Úvod

Eurokódy boli navrhnuté tak, aby sa používali v spojení s príslušnými vykonávacími, materiálovými, produktovými a skúšobnými normami. Eurokód 7 je určený na použitie v spojení s EN 1990 *Navrhovanie stavebných a geotechnických konštrukcií,* ktorá stanovuje zásady a požiadavky na bezpečnosť, použiteľnosť, robustnosť a trvanlivosť konštrukcií vrátane

geotechnických konštrukcií a iných stavebných prác. Spolu je publikovaných 9 základných častí a pripravujú sa ďalšie 2 eurokódy. Výskumné centrum EÚ – JRC (*Joint Research Centrum*) navrhlo pre každú časť eurokódov (EC) logo (ikonu) a jeho farebné variácie (obr. 1).

Eurokód 7 *Navrhovanie geotechnických konštrukcií* definuje nové termíny, dôležité pre navrhovanie geotechnických konštrukcií, ktorými sú Model horninového prostredia a Geotechnický model. Podľa EN 1997-2 *Vlastnosti horninového prostredia* musí model horninového prostredia zahŕňať geologické, hydrogeologické a geotechnické pomery na lokalite na základe výsledkov prieskumu horninového prostredia. **Model horninového prostredia** obsahuje odvodené hodnoty relevantných vlastností horninového prostredia pre všetky geotechnické jednotky vyskytujúce sa v zóne vplyvu. Vytvára sa v niekoľkých etapách a má sa priebežne aktualizovať a prehodnocovať. Údaje na vytvorenie modelu horninového prostredia sa zhromažďujú v priebehu štúdie, inšpekcie (obhliadky) staveniska, počas terénneho a laboratórneho skúšania v predbežnom, podrobnom a doplnkovom prieskume horninového prostredia a počas monitoringu. **Geotechnická jednotka** (celok) je objem horninového prostredia alebo vrstvy horninového prostredia, ktorá je definovaná ako jeden materiál.

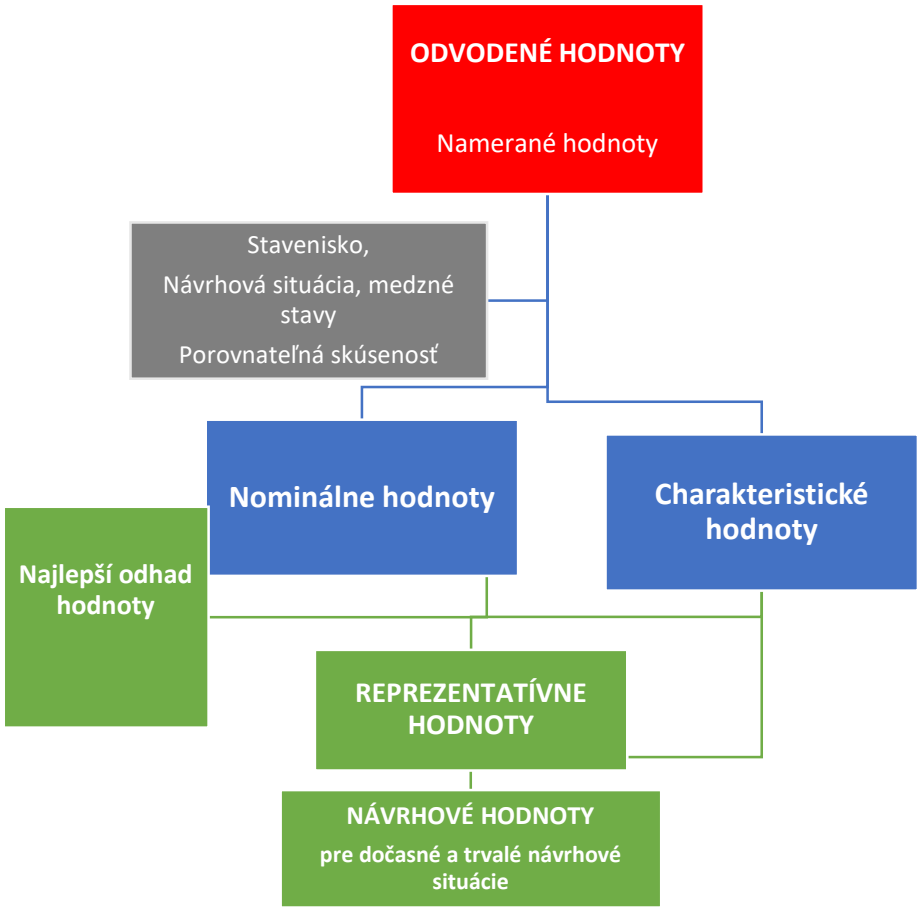


Obr.1 Ikony pre jednotlivé časti eurokódov navrhnuté JRC (EC 0 až EC 11)
Fig. 1 Eurocodes visuals by JRC(EC 0 to EC 11)

2. Vlastnosti horninového prostredia

V Eurokóde 7 druhej generácie sa používajú a definujú nové typy hodnôt geotechnických vlastností. Takouto je napríklad reprezentatívna hodnota, najlepší odhad hodnoty, nominálna a indikatívna hodnota. Novú definíciu a význam má charakteristická hodnota, ktorú v zmysle doterajšieho významu nahrádza termín reprezentatívna hodnota. Význam charakteristickej hodnoty a jej definícia sa mení, aj keď tento termín v eurokódoch naďalej zostáva.

Schéma rôznych hodnôt geotechnických vlastností zahrnutých v druhej generácii eurokódov od odvodených hodnôt k návrhovým hodnotám je znázornená na obrázku 2.



Obr.1 Odvodené a ďalšie hodnoty vlastností horninového prostredia v druhej generácii eurokódov
Fig. 1 Paths from derived values to best estimate and design values

2.1 Merané a odvodené hodnoty

Definície meraných a odvodených hodnôt sa v podstate nemenia. Meraná hodnota horninového prostredia je definovaná v EN 1997-2 ako hodnota horninového prostredia zaznamenaná počas skúšky. Odvodená hodnota vlastnosti horninového prostredia je hodnota vlastnosti horninového prostredia získaná teóriou, koreláciou alebo použitím empirických koeficientov z výsledkov skúšok alebo meraní v teréne. Sú to jediné hodnoty bez významnej zmeny.

Odvodené hodnoty vlastností geotechnickej jednotky sa stanovia z údajov získaných počas dokumentačnej štúdie, inšpekcie miesta, predbežných a podrobných prieskumov a monitorovania horninového prostredia a konštrukcií. Sú to základné vstupné údaje na vytvorenie modelu horninového prostredia. EN 1997-2 požaduje, aby empirické korelácie a teórie použité na získanie odvodených hodnôt boli zdokumentované v správe o prieskume horninového prostredia a odporúča, aby sa údaje špecifické pre lokalitu použili na podporu generických korelácií. Údaje špecifické pre lokalitu majú vo všeobecnosti za následok menšie korelačné chyby. Určenie odvodenej hodnoty sa môže rozdeliť do niekoľkých stupňov:

- Prvým krokom je odstránenie všetkých nesprávnych hodnôt, ktoré sú rozpoznané a generované meraním alebo inými chybami.
- Druhým krokom je identifikácia geotechnických celkov v mieste prieskumu v zóne vplyvu relevantnej pre návrhovú situáciu.
- Tretím krokom je získanie odvodených hodnôt vlastností horninového prostredia v každom geotechnickom celku.

– Štvrtým krokom je použitie úprav alebo opráv na úpravu odvodených hodnôt, aby sa zohľadnili rozdiely medzi skúšobnou situáciou a návrhovou situáciou, napríklad aby sa zohľadnili vplyvy mierky.

2.2 Reprezentatívne hodnoty

Reprezentatívna hodnota horninového prostredia X_{rep} je definovaná ako nominálna alebo charakteristická hodnota vrátane prevodného faktora. Návod na výber reprezentatívnych hodnôt je uvedený v EN 1997-1. Reprezentatívne hodnoty vlastností horninového prostredia, ktoré sa majú použiť pri overovaní medzného stavu únosnosti a používateľnosti, sa určia z odvodených hodnôt zhromaždených v správe z prieskumu horninového prostredia – GIR (*Ground Investigation Report*). Reprezentatívna hodnota sa vzťahuje na konkrétnu vlastnosť horninového prostredia jednej geotechnickej jednotky. Ako jedno z opatrení na validáciu modelu geotechnického návrhu je v EN 1997-1 uvedené, že odvodené hodnoty z rôznych zdrojov v rámci každej geotechnickej jednotky by sa mali porovnať, aby sa určili reprezentatívne hodnoty s primeranou úrovňou spoľahlivosti.

Podľa normy EN 1997-1 sa reprezentatívna hodnota vlastnosti horninového prostredia, X_{rep}, určí buď zo vzorca (1.1) alebo vzorca (1.2):

$$X_{rep} = X_{nom} \tag{1.1}$$

alebo

$$X_{rep} = X_{k} \tag{1.2}$$

kde X_{nom} je nominálna hodnota a X_k je charakteristická hodnota.

Reprezentatívna hodnota X_{rep} by sa mala určiť z (1.2), ak existuje dostatok údajov na spoľahlivé určenie charakteristickej hodnoty X_k; v opačnom prípade by sa mala určiť z rovnice (1.1). Je to dôležité odporúčanie. Norma EN 1997-1 však neposkytuje žiadne usmernenie o tom, čo znamená „ dostatok údajov“ na použitie štatistického prístupu a určenie charakteristickej hodnoty pomocou vzorca 1.2. To bude závisieť od mnohých faktorov vrátane premenlivosti terénu, povahy a zložitosti navrhovanej geotechnickej konštrukcie, ktorú predstavuje jej geotechnická kategória. Existujú rôzne názory na minimálny počet odvodených hodnôt, ktoré by mali byť k dispozícii pred použitím štatistických analýz. Jedným z orientačných pravidiel, ktoré môže byť užitočné, je použiť štatistiku, ak existuje 10 alebo viac odvodených hodnôt. Očakáva sa, že v praxi, s výnimkou prípadu veľkých projektov, nebude dostatok údajov na určenie X_{rep} pomocou vzorca 1.2, a preto sa X_{rep} bude musieť určiť ako nominálna hodnota pomocou vzorca (1.1) a z porovnateľných skúseností.

Na získanie reprezentatívnej hodnoty horninového prostredia možno použiť prevodný – konverzný faktor na zohľadnenie rôznych významných vplyvov, okrem iného vplyvu podzemnej vody, vlhkosti, teploty, starnutia materiálov, dráhy napätia, anizotropie alebo deformácie. Konverzný faktor h je 1,0 pre prípady, keď sú tieto vplyvy zahrnuté pri výbere nominálnej hodnoty. Faktor h by sa mal použiť na zohľadnenie účinkov týkajúcich sa konkrétnej návrhovej situácie.

EN 1997-1 zavádza h ako opravnú hodnotu aj z dôvodu, že napr. projekty musia plne zohľadňovať skutočnosť, že podmienky stanovené počas prieskumu horninového prostredia nemusia byť reprezentatívne pre podmienky návrhu. Jednoduchým príkladom toho je, že dlhodobá neodvodnená pevnosť v šmyku ílu na dne výkopu bude v dôsledku napúčania nižšia, ako bola nameraná počas prieskumu horninového prostredia pred výkopom. Táto korekcia (faktor h) umožňuje zmenu reprezentatívnej hodnoty v dôsledku týchto vplyvov.

Pri určovaní reprezentatívnej hodnoty horninového prostredia je potrebné zohľadniť:

- už existujúce znalosti vrátane geologických informácií a údajov z predchádzajúcich projektov (porovnateľné skúsenosti);
- neistotu v dôsledku množstva a kvality údajov špecifických pre danú lokalitu;
- neistotu v dôsledku priestorovej variability meranej vlastnosti;
- zónu vplyvu konštrukcie pri posudzovanom medznom stave.

Porovnateľné skúsenosti sú definované v EN 1997-1 ako zdokumentované predchádzajúce informácie o správaní horninového prostredia a konštrukcie, ktoré sa považujú za relevantné pre projektovanie, ako vyplýva z geologickej, geotechnickej a konštrukčnej podobnosti s návrhovou situáciou.

Reprezentatívna hodnota vlastnosti horninového prostredia sa určí pre každý medzný stav podľa jeho citlivosti na priestorovú variabilitu vlastnosti horninového prostredia v objeme dotknutého podložia (zóna vplyvu). Ak je medzný stav necitlivý na priestorovú variabilitu terénu, vlastnosť horninového prostredia sa určí ako opatrný priemer hodnoty. Tento typ odhadu reprezentatívnej hodnoty sa nazýva typ A. Je to štandardná situácia pre geotechnický návrh v homogénnych základových pomeroch. Ak je medzný stav citlivý na priestorovú variabilitu terénu, vlastnosť horninového prostredia sa určí ako horšia alebo nižšia hodnota. Takéto základové pomery sa označujú ako typ B odhadu reprezentatívnej hodnoty a návrhová situácia zodpovedá lokálnemu porušeniu, kde je priestorová variabilita významná, takže medzný stav riadi neúnosná (oslabená) zóna v rámci geotechnickej jednotky.

Skutočnosť, že medzné stavy v geotechnickom návrhu sú niekedy citlivé a niekedy nie na variabilitu horninového prostredia, je dôvodom, prečo sa geotechnický návrh, a teda aj EN 1997 líši od návrhu stavebných konštrukcií. Dôvodom, prečo sú medzné stavy pri navrhovaní konštrukcií citlivé na variabilitu materiálu, je to, že pri navrhovaní konštrukcií sa predpokladá, že všetok materiál v objeme, ktorý sa podieľa na medznom stave, napríklad pevnosť betónu v nosníku, je homogénny bez priestorovej variability tak, že je potrebné zvoliť 5 % kvantil, aby sme mali 95 % úroveň spoľahlivosti. Pevnosť nebude menšia ako charakteristická hodnota. Avšak v geotechnickom navrhovaní nie je horninové prostredie vo všeobecnosti homogénne, ale je inherentne variabilné a mení sa priestorovo. Pri výbere reprezentatívnej hodnoty vlastnosti horninového prostredia je potrebné zvážiť premenlivosť horninového prostredia aj medzný stav. To vedie k trom typom (A, B a C) odhadu reprezentatívnej hodnoty horninového prostredia.

2.3 Nominálne hodnoty

Nominálna hodnota horninového prostredia X_{nom} je definovaná v EN 1990-1 ako „*hodnota stanovená na neštatistickom základe*; napríklad na základe skúseností. EN 1997-1 to rozvádza tak, že nominálnu hodnotu definuje ako „*opatrný odhad hodnoty ovplyvňujúcej výskyt medzného stavu (priemerný, nižší alebo vyšší) na základe znalosti miesta stavby a skúseností v porovnateľných prípadoch*“. Odkaz na opatrný odhad je rovnaký ako definícia charakteristickej hodnoty až na to, že charakteristická hodnota sa určí štatistickými metódami, zatiaľ čo nominálna hodnota nie. Aj keď nie je výslovne uvedené, že nominálna hodnota sa vyberá z odvodených hodnôt, požiadavka, aby nominálna hodnota zohľadňovala znalosti o stavenisku, by sa mala interpretovať tak, že nominálne hodnoty sú skutočne založené na odvodených hodnotách.

Nominálna hodnota horninového prostredia sa môže použiť ako reprezentatívna hodnota pri výpočtoch overenia geotechnického návrhu podľa EN 1997-3. Je to opatrný odhad hodnoty vlastnosti zvolenej tak, aby reprezentovala správanie sa objemu horninového prostredia v uvažovanom medznom stave. Vyberá ho projektant na základe rozptylu odvodených hodnôt, znalostí daného miesta a skúseností z podobných návrhových situácií, teda vychádza

z porovnateľných skúseností. V závislosti od návrhovej situácie môže byť menovitá hodnota zvolená ako:

- Opatrný odhad priemeru odvodených hodnôt, keď porucha zahŕňa veľký objem horninového prostredia, ako v prípade stability svahu, teda typ A,
- Opatrnejší odhad napr. dolná hranica odvodených hodnôt, keď ide o malý objem zeminy, ako v prípade porušenia okolo päty piloty, t. j. odhad typu B.

2.4 Indikatívne hodnoty

Indikatívne – orientačné hodnoty nie sú definované v EN 1990-1 ani v EN 1997-1, ale text EN 1997-1 sa na tieto hodnoty odkazuje. V EN 1997-2 alebo v EN 1997-3 nie sú žiadne odkazy na indikatívne hodnoty. Odkazy na indikatívne hodnoty v EN 1997-1 sú napr. v článku 4.3.2.3(2), v ktorom sa uvádza, že „*Indikatívne hodnoty sa môžu použiť ako nominálne hodnoty za predpokladu, že sú špecifikované príslušným orgánom, alebo dohodnuté pre konkrétny projekt príslušnými stranami*.“ Ak sa ako nominálna hodnota používa orientačná hodnota, musí sa zvoliť ako veľmi opatrný odhad hodnoty ovplyvňujúcej vznik medzného stavu.

Indikatívne hodnoty by mali byť definované v EN 1990-1 a aj v EN 1997-1. Súčasný text je mätúci, ale môže sa ešte zmeniť v priebehu posledného pripomienkovania tento rok.

Použitie veľmi opatrných indikatívnych hodnôt vlastností je vhodné na overenie návrhu geotechnickej kategórie 1, napríklad pri výbere predpokladaných únosností pre plošné základy. Predpokladané únosnosti základovej pôdy nie sú založené na odvodených vlastnostiach pevnosti horninového prostredia pre konkrétne miesto, ale možno ich získať ako výsledok prepojenia identifikovaného typu horninového prostredia (triedy zeminy) a rozsiahlych skúseností s horninovým prostredím s charakteristickými vlastnosťami, ako je napr. index konzistencie alebo relatívna uľahnutosť.

2.5 Charakteristické hodnoty

Charakteristická hodnota vlastnosti materiálu alebo výrobku X_k je definovaná v EN 1990-1 ako h*odnota vlastnosti materiálu alebo výrobku s predpísanou pravdepodobnosťou, že sa nedosiahne v hypotetickej neobmedzenej sérii skúšok*. Táto hodnota vo všeobecnosti zodpovedá špecifikovanému kvantilu predpokladaného štatistického rozdelenia konkrétnej vlastnosti materiálu alebo výrobku, čo znamená, že na rozdiel od nominálnej hodnoty sa charakteristická hodnota určuje pomocou štatistických metód.

Charakteristická hodnota vlastnosti horninového prostredia je definovaná v EN 1997-1 ako štatistické určenie hodnoty vlastnosti horninového prostredia, ktorá ovplyvňuje výskyt medzného stavu s predpísanou pravdepodobnosťou, že sa nedosiahne. Neexistuje žiadny odkaz na neobmedzenú sériu skúšok, ako je to v definícii EN 1990, pretože to v prípade horninového prostredia nie je možné. Táto hodnota zodpovedá špecifikovanému kvantilu predpokladaného štatistického rozdelenia konkrétnej vlastnosti horninového prostredia.

EN 1997-1 uvádza, že keď je overovanie geotechnického medzného stavu citlivé na premenlivosť vlastnosti horninového prostredia, jeho charakteristická hodnota by mala byť definovaná ako:

- 5 % kvantilná hodnota, keď je nízka (nižšia) hodnota vlastnosti horninového prostredia nepriaznivá; alebo
- 95 % kvantilná hodnota, keď je vysoká hodnota vlastnosti horninového prostredia nepriaznivá.

Tieto definície zodpovedajú typu B odhadu reprezentatívnej hodnoty diskutovanej v časti 2.4.

2.6 Najlepšie odhadnutá hodnota

Najlepšie odhadnutá hodnota horninového prostredia je definovaná v EN 1997-1 ako „*odhad najpravdepodobnejšej hodnoty horninového prostredia*“. Najlepšie odhadnutá hodnota je hodnota použitá na predpovedanie najpravdepodobnejšieho správania sa konštrukcie. Môže sa určiť jedným z nasledujúcich troch spôsobov:

- Ako najpravdepodobnejšia hodnota získaná zo vzorky odvodených hodnôt uvažovanej vlastnosti horninového prostredia;
- Ako priemer alebo medián odvodených hodnôt vzorky, podľa toho, čo sa považuje za najvhodnejšie; alebo
- Ako najpravdepodobnejšia hodnota získaná spätnou analýzou vykonanou modelovaním správania konštrukcie pomocou geotechnického monitoringu.

Najlepšie odhadovaná hodnota horninového prostredia sa líši od reprezentatívnej hodnoty v tom, že nejde o opatrný odhad hodnoty horninového prostredia, ale ide o odhad hodnoty horninového prostredia, ktorý umožňuje predpovedať najpravdepodobnejšie, t. j. skutočné správanie konštrukcie, a preto neposkytuje žiadnu mieru bezpečnosti.

Zatiaľ čo najlepší odhad hodnoty vlastností horninového prostredia je definovaný a vysvetlený v EN 1997-1, v EN 1997-2 nie sú žiadne odkazy na tento typ hodnôt vlastností horninového prostredia alebo na ich použitie pri geotechnickom návrhu v EN 1997-3. Dôvodom je skutočnosť, že na zabezpečenie požadovanej spoľahlivosti alebo miery bezpečnosti požadovanej v návrhoch medzného stavu únosnosti aj používateľnosti sa bežne používajú návrhové hodnoty vlastností horninového prostredia, založené na výbere reprezentatívnych hodnôt. Pri použití pozorovacej metódy však možno na overenie medzných stavov prijať v súlade s EN 1997-1 najlepšie odhadnuté hodnoty. V tejto situácii sa môžu použiť ako jeden z rôznych variantov návrhu na predpovedanie skutočného správania sa konštrukcie.

Ďalšou aplikáciou najlepšie odhadnutých hodnôt je overenie korelácií pre hodnoty vlastností horninového prostredia pri monitorovaní správania sa horninového prostredia alebo podzemnej konštrukcie. Typickým príkladom by bola spätná analýza skúšania zaťaženia pilóty, kde sa musí použiť najlepšia odhadovaná hodnota vlastnosti horninového prostredia, aby sa získal najlepší výber metódy návrhu (empirická súvislosť medzi vlastnosťami horninového prostredia a odporom pilóty).

3. Záver

Revízia eurokódov je intenzívna, dôkladná a dlhodobá činnosť. Návrhy druhej generácie eurokódov sú pripravené na posledné kolo pripomienok a následný proces schvaľovania, ktorý začína už tento rok. V článku sú prezentované len niektoré zmeny, súvisiace s prieskumom horninového prostredia. Hodnoty geotechnických parametrov – vstupy do výpočtov na základe prieskumu horninového prostredia– sú nepochybne významnou súčasťou navrhovania geotechnických konštrukcií a je potrebné rozumieť termínom s nimi spojenými.

Konečné hlasovanie a schválenie novej verzie eurokódov prebehne až v roku 2024. Tento a budúci rok sa pripravuje príručka na používanie Eurokódu 7 a hľadajú sa možné „slabé“ miesta v súčasnom texte noriem. Ešte stále je možné pripomienkovať Eurokód 7 prostredníctvom pracovných skupín CEN TC 250 SC 7. Pred vydaním Eurokódu 7 bude potrebné pracovať na národných prílohách, ktoré by mali byť publikované spolu s Eurokódom 7 druhej generácie.

Poďakovanie

Príspevok je jedným z výstupov grantovej úlohy č. 1/0745/21 agentúry VEGA

Zoznam literatúry

CEN TC 250 SC 7: Pracovné materiály a dokumenty WG 1, 2019 a 2020
CEN TC 250 SC 7: Pracovné dokumenty TG C2 *From derived to design values*, 2022
prEN 1997-1: 2020 Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Všeobecné pravidlá
prEN 1997-2: 2020 Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Vlastnosti horninového prostredia
prEN 1997-3: 2020 Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Geotechnické konštrukcie

EFEKTÍVNE SPRACOVANIE ÚDAJOV Z ROZSIAHLEHO INŽINIERSKOGEOLOGICKÉHO PRIESKUMU POMOCOU STROJOVÉHO UČENIA

EFFECTIVE DATA PROCESSING FROM EXTENSIVE ENGINEERING GEOLOGICAL SURVEY WITH AID OF MACHINE LEARNING

Jakub Panuška[1], Miloslav Kopecký[2], Martin Brček[3]

[1]PanGEO s.r.o., Pražská 1451/15, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, e-mail: panuska.geotech@gmail.com
[2] Katedra geotechniky SvF STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: miloslav.kopecky@stuba.sk
[3]Katedra geotechniky SvF STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: martin.brcek@stuba.sk

Abstrakt: Príspevok sa venuje spracovaniu údajov a vytvoreniu prediktívneho inžinierskogeologického modelu podložia z rozsiahleho inžinierskogeologického prieskumu vykonaného pozdĺž 15 km dlhého diaľničného úseku. Základnými vstupnými parametrami modelu sú polohopisné a výškopisné údaje, na základe ktorých je vytvorený pomocou algoritmov strojového učenia inžinierskogeologický profil s priradenými homogenizovanými celkami zemín, deformačnými parametrami a hladinou podzemnej vody aj v oblastiach trasy, kde sa nevykonali prieskumné práce. V rámci vytvorenia celého algoritmu, v jazyku Python, boli na vytvorenie inžinierskogeologického profilu použité základné štatistické metódy a algoritmy strojového učenia – regresia, klasifikácia, *clustering*. Výsledné predikcie sú porovnané s inžinierskogeologickými profilmi zhotovenými geológom. Výsledky poukazujú na dobrú zhodu a prijateľné rozdiely pri výrazne vyššej efektivite pri použití naprogramovaného algoritmu. Získané inžinierskogeologické profily slúžili na výpočet sadania podložia násypov v trase diaľnice.

Abstract: The article discusses data processing and development of predictive ground model on the basis of data from extensive engineering geological survey. Basic model inputs are spatial coordinates (X, Y, elevation). Ground model with assigned soil groups, deformation properties and ground water level is created with input of spatial coordinates. Basic statistical and machine learning algorithms (regression, classification, clustering) were used in Python script to develop predictive ground model. Predictions are compared with the ground model developed by engineering geologist. Results show high prediction accuracy with acceptable error, but with higher effectivity if machine learning is used.

Kľúčové slová: prediktívny model, spracovanie údajov, inžinierskogeologické profily, automatizácia

Key words: predictive model, data processing, engineering geological profiles, automation

1. Úvod

Strojové učenie je v geotechnickom inžinierstve, vzhľadom k množstvu generovaných údajov a značnej dávke empirizmu, používané čoraz viac. Tieto metódy boli použité napríklad na predikciu šmykového modulu pri malých pretvoreniach (Cruz, Santos, & Cruz, 2013), určenie trendu svahových pohybov v čase (Yang, Yin, & Liu, 2019) a určenie potenciálu stekutenia zemín (Goh & Goh, 2007), (Samui & Sitharam, 2011). Zároveň existuje množstvo odborných príspevkov venujúcich sa klasifikácii podložia alebo mapovaniu určitej geologickej črty v rámci rozsiahlych území (Šapina, 2016), (Zhou & Wu, 1994), (Tsiaousi, Travasarou, Drosos, Ugalde, & Chacko, 2018). Strojové učenie použité na vytvorenie modelu podložia môže byť v súčasnosti porovnané, resp. určitým spôsobom podobné, niektorým geoštatistickým postupomm napr. krigingu (Cressie, 1990).

V predloženom príspevku je strojové učenie použité na vytvorenie modelu podložia v miestach bez inžinierskogeologického prieskumu. Model podložia je potrebný za účelom automatickej generácie inžinierskogeologických profilov, ktoré boli následne využité na výpočet sadania podložia násypov v trase diaľnice. Takýto automaticky generovaný profil musí z dôvodu potreby výpočtu sadania obsahovať deformačné parametre (oedometrický modul E_{oed}) jednotlivých vyčlenených skupín zemín. Oedometrický modul bol jednotlivým vyčleneným skupinám zemín priradený na základe typu zeminy a jej fyzikálneho stavu (konzistencia, uľahnutosť). S pomocou automatickej generácie inžinierskogeologických profilov s priradeným deformačnými vlastnosťami bolo možné v priebehu niekoľkých minút vypočítať sadanie násypov v 111 profiloch určených JTSK súradnicami *X, Y* a nadmorskou výškou výpočtového miesta.

2. Materiály a metódy

2.1 Vstupné údaje

Údaje z inžinierskogeologického prieskumu predstavujú najdôležitejšiu časť analyzovaných dát. Na ich základe bol „natrénovaný“ a vytvorený model podložia. V rámci dát z prieskumu boli pre analýzu použité nasledujúce údaje:

- písomná dokumentácia realizovaných a archívnych inžinierskogeologických vrtov,
- polohopisné údaje vrtov (poloha *X*, *Y* (m) v rámci súradnicového systému S-JTSK) a ich nadmorská výška *Z* (m n.m.),
- ustálená hladina podzemnej vody (v metroch pod terénom, v metroch nad morom),
- údaje o odobratých vzorkách z prieskumných vrtov, laboratórne výsledky určenia Atterbergových medzí, krivky zrnitosti a oedometrických modulov E_{oed} .

Popisy vrtov boli transformované a spracované do požadovanej formy v prostredí *MS Excel* pomocou naprogramovaných makier v prostredí *Visual Basic for Applications* (*VBA*). Z vrtov boli na základe hľadania textových reťazcov extrahované:

- názov vrtu,
- trieda zeminy podľa klasifikácie *USCS* (American Society for Testing and Materials, 2017),
- hĺbky ohraničujúce konkrétnu homogénnu vrstvu (hĺbky získané v metroch od povrchu terénu ako aj v metroch nad morom)
- konzistencia zeminy, ktorá bola priraďovaná vždy smerom nadol podľa nasledovnej hierarchie → opis (kľúčové slová) „tuhá až pevná“ alebo „pevná až tuhá“ → výsledná konzistencia tuhá so symbolom *T*,

- v prípade zvyšku organických látok (kľúčové slová: detrit, zhnité drevo, dreviny, rastliny) bola zemina kategorizovaná ako zemina s obsahom organických látok a označená symbolom *O*,
- homogenizovaná skupina zeminy → *f [F8,F7,F6,F5], fs [F4, F3, S5, S4], fg [F2, F1, G5, G4], g [G3, G2, G1], s [S3, S2, S1], r [poloskalné horniny], OR, Y*,
- pôvod/genéza zeminy *D (deluviálny), F (fluviálny), N (neogénny),*
- polohopisné a výškopisné súradnice vrtu *X, Y, Z*,
- ustálená hladina podzemnej vody.

Takýmto spôsobom bolo spolu spracovaných a použitých ***444 vrtov***, v ktorých bolo spolu vyčlenených ***3 558 vrstiev***.

Fyzikálne a deformačné vlastnosti zemín

Zo všetkých dostupných údajov boli použité predovšetkým Atterbergove medze, medza tekutosti w_L, medza plasticity w_P a podiel jednotlivých zrnitostných frakcií za účelom homogenizácie zemín do kvázi homogénnych skupín. Všetky získané údaje obsahovali zrnitostný rozbor aj hodnoty w_L a w_P (pre jemnozrnné zeminy). Spolu bolo získaných ***1 071 údajov*** pre ďalšiu analýzu (jeden údaj predstavuje jednu odobranú vzorku zeminy z vrtu).

Zo všetkých dostupných oedometrických skúšok zemín boli použité údaje z druhého zaťažovacieho stupňa skúšky. Spolu bolo pre potreby výpočtu sadania násypov a homogenizácie celkov pozdĺž trasy (celky s približne rovnakými deformačnými vlastnosťami) získaných ***109 údajov oedometrických modulov E_{oed}.***

2.2 Strojové učenie

Vzhľadom na rozsiahlosť údajov a potrebu automaticky generovať inžinierskogeologické profily s hladinou podzemnej vody, priradeným fyzikálnymi a deformačnými parametrami, boli na základe polohopisných a výškopisných údajov použité matematicko-štatistické modely a algoritmy súhrnne označované ako strojové učenie. V rámci tejto analýzy boli použité tieto skupiny algoritmov a metódy:

- clustering,
- regresia,
- klasifikácia.

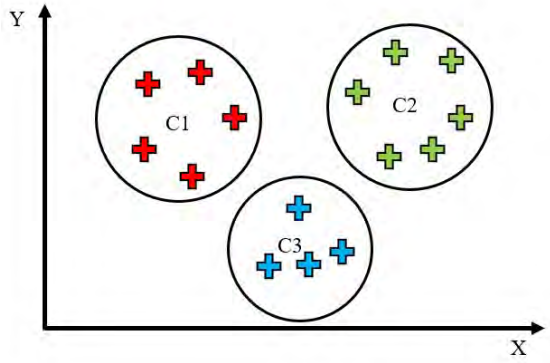
K – means clustering (KMC)

K – means patrí k algoritmom učenia bez učiteľa. To znamená, že pri klasifikácii máme údaje, ale neviem do akých tried tieto údaje patria. Algoritmus *K – means* pri takejto úlohe určí značky / triedy jednotlivým údajom. Situácia takejto úlohy je zobrazená na Obr. 1. Pri algoritme *K – means* je potrebné na začiatku určiť počet klastrov, do ktorých budú údaje priradené. Následne sa určí ťažisko klastra a údaje sa priradia do jednotlivých klastrov podľa vzdialenosti bodov od ťažiska (vzdialenosť v Euklidovskom priestore). Takýmto spôsobom sa vytvoria všetky klastre. Počiatočný počet clustrov, ako aj nová poloha ťažiska, sa počíta na základe minimalizácie hodnoty *Within Cluster Sum of Squares (WCSS)*, čo znamená minimalizácia štvorca vzdialeností bodov P_i v rámci klastra a ťažiska tohto ra C.

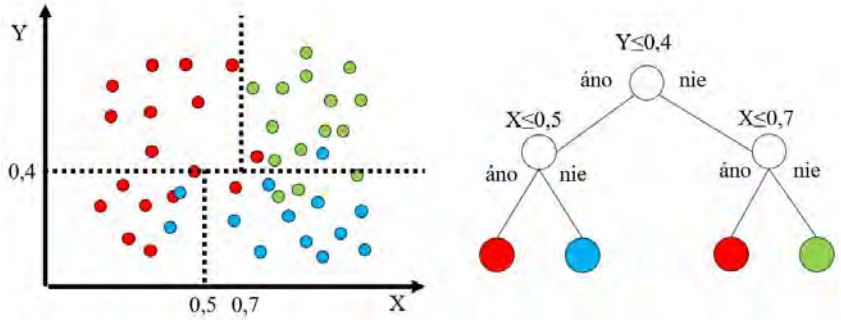
Random Forest (RF)

Algoritmus *Random Forest (RF)* patrí k relatívne jednoduchým algoritmom, využívajúcim klasické rozhodovacie stromy a metódu *„Bootstrap aggregation“*. Tento algoritmus patrí do skupiny algoritmov učenia s učiteľom. To znamená, že v prípade klasifikácie poznáme kam jednotlivé triedy patria a na základe vzorov / premenných, ktoré sme

algoritmu dali, spolu s korešpondujúcimi triedami, sa model naučí vzťahy medzi danými údajmi a je schopný predpovedať nové hodnoty.



Obr. 1 Clustering.
Fig. 1 Clustering.



Obr. 2 Jednoduchý rozhodovací strom.
Fig. 2 Simple decision tree.

Na Obr. 2 je zobrazený jednoduchý rozhodovací strom, ktorý sa na základe dvoch premenných snaží určiť jednu z troch tried. Každý uzol rozhodovacieho stromu v danom príklade, t. j. každá deliaca čiara v danom dvojrozmernom priestore, je riadený informačným ziskom. Každý bod rozdelenia je teda určený tak, aby mal čo najväčší informačný zisk, čo znamená, že maximalizujeme pravdepodobnosť, že danú triedu určíme správne.

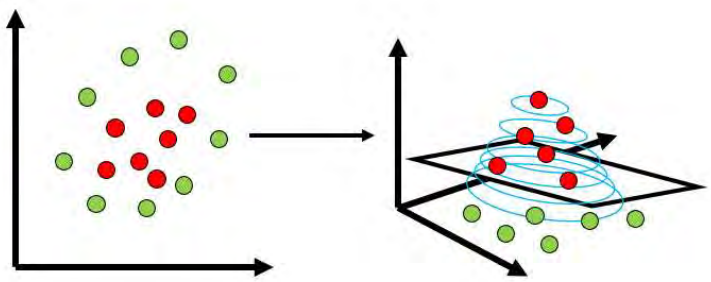
Celý algoritmus *RF* je potom vytvorený na báze viacerých rozhodovacích stromov v zmysle metódy *„Bootstrap aggregation“*. To znamená, že je použitých viacero rozhodovacích stromov. Ich výsledky sa na záver zosumarizujú a určí sa výsledná predpovedaná hodnota (Breiman, 2001).

Support Vector Machines (SVM)

Metóda *Support Vector Machines (SVM)* patrí medzi metódy učenia s učiteľom (Vapnik, 1995). Úlohou tejto metódy pri klasifikačnom probléme je určiť *n* – rozmernú rovinu tak, aby na základe zvolených premenných čo najlepšie rozdeľovala vyčlenené triedy výsledkov. V prípade tejto štúdie nie sú údaje lineárne separovateľné a preto je použitý tzv. *RBF (radial basis function) kernel* (Pedregosa, a iní, 2011). Je to funkcia, ktorou prenásobíme všetky hodnoty (zvýšime rozmer úlohy) a následne je možné ich preložiť rovinou, sú lineárne separovateľné. V ďalšom kroku sú rovina aj údaje spätne transformované a rovina sa stáva nelineárnou funkciou. Tento proces je znázornený na Obr. 3.

Posledným potrebným krokom je prevedenie úlohy z binárnej klasifikácie na viac triedovú klasifikáciu. V tejto práci je použitá stratégia „*One vs. One*“, t. j. jeden na jedného (Pedregosa, a iní, 2011). Pri takejto stratégii sa súbor viacerých tried rozdelí na čiastkové úlohy (všetky kombinácie dvojíc tried), kedy je klasifikovaná jedna trieda na dvojicu. To znamená, že je vždy natrénovaný a overený jeden model pre konkrétnu triedu. Počas predikcie sa pri

klasifikácii využíva systém výberu zo všetkých modelov na základe výskytu najvyššieho počtu danej triedy. Na vylepšenie algoritmu bola v tejto práci pri použití *SVM* použitá metóda *Bootstrap aggregation.*

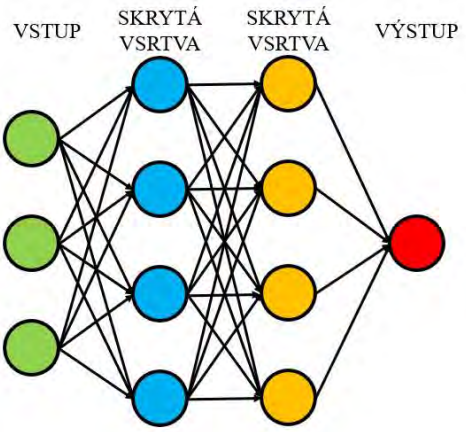


Obr. 3 Aplikácia RBF funkcie.
Fig. 3 Application of RBF function.

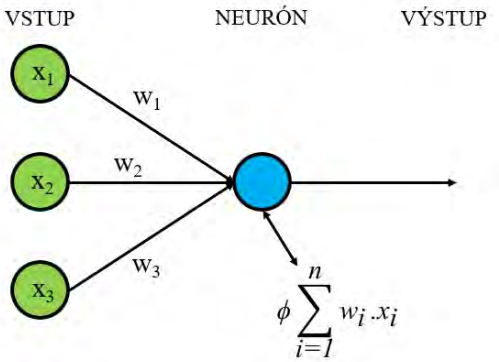
Artificial Neural Networks (ANN) – neurónové siete

Architektúra hlbokej neurónovej siete (v rámci modulu Keras bola použitá metóda *Dense* (Chollet, F. a kolektív, 2015)) a je uvedená na Obr. 4. V takejto architektúre je počiatočný neurón prepojený so všetkými neurónmi v nasledujúcej vrstve. Počet vrstiev na vstupe, výstupe alebo v skrytých vrstvách, rovnako ako aj počet skrytých vrstiev je ľubovoľný. Prepojenie medzi neurónmi je pomocou synapsií, ktoré šíria hodnotu x_i z počiatočného neurónu do nasledujúcich a násobia ich váhami w_i. V nasledujúcich neurónoch následne prebieha suma vstupov prenásobených váhami a táto suma je násobená zvolenou aktivačnou funkciu ϕ (tu zvolenou ako ReLU- Rectified Linear Unit). Princíp výpočtu a prenosu informácie je na Obr. 5, aktivačná funkcia je na Obr. 6. V poslednom výstupnom uzle je v prípade tejto analýzy aktivačná funkcia nezadaná z dôvodu, že *ANN* je použitá na regresiu. Celý proces učenia je nasledovný:

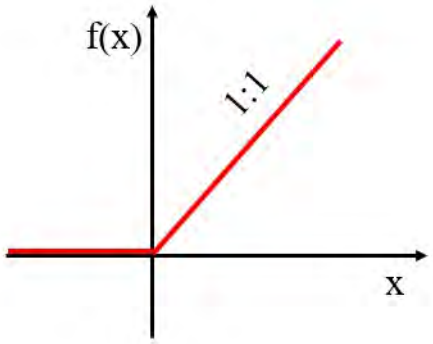
1. Inicializácia váhy pre každý uzol, napríklad hodnota blízka nule.
2. Zadanie vstupov do prvej vrstvy.
3. Šírenie smerom dopredu, pokiaľ nie je dosiahnutý výstupný uzol.
4. Porovnanie vypočítanej *Y´*, nameranej hodnoty *Y*. Chybová funkcia $MSE = 0{,}5.(Y' - Y)^2$.
5. Spätné šírenie chyby a opätovné stanovenie váh. Spätné šírenie v našom prípade neprebehlo po každom riadku súboru dát, ale po 10 riadkoch („*Batch Learning*“).
6. Výpočet pre celý súbor dát = jedna epocha.
7. Opakovanie niekoľkých epoch, pre získanie presnejšieho modelu (5 000 epoch).



Obr. 4 Architektúra neurónovej siete - Deep Feed Forward.
Fig. 4 Neural network architecture – Deep Feed Forward.



Obr. 5: Spôsob prenosu informácie v rámci siete.
Fig. 5: Transfer of information in network.



Obr. 6 Použitá aktivačná funkcia, ReLU.
Fig. 6 ReLU activation function used in this study.

Postup riešenia:

1. Homogenizácia zemín do skupín
2. Vyčlenenie kvázi – homogénnych celkov trasy (*K – means clustering*)
3. Regresný model pre určenie úrovne hladiny podzemnej vody (*Artificial Neural Networks*)
4. Klasifikačný model pre určenie genézy zemín (*Random Forest*)
5. Klasifikačný model pre určenie skupiny zemín (*Random Forest*)
6. Priradenie deformačných a fyzikálnych vlastností ku zeminám (*Support Vector Machines, stratégia One vs. One, metóda Bootstrap Aggregation*)
7. Priradenie deformačných a fyzikálnych vlastností ku zeminám

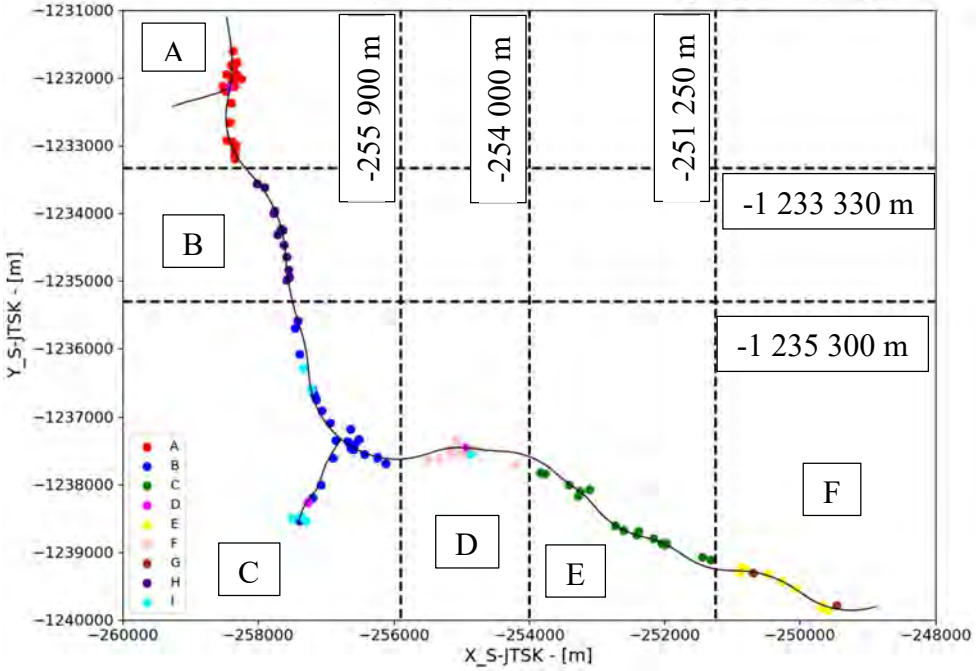
3. Výsledky a diskusia

Homogenizácia zemín do skupín

Na vyčlenenie kvázi – homogénnych celkov bol použitý algoritmus *KMC*. Premennými vstupujúcimi do algoritmu sú polohopisné údaje *X, Y (m)* v systéme JTSK, nadmorská výška povrchu terénu *Z* (m n.m.), oedometrický modul E_{oed} (MPa). Spolu bolo použitých 109 údajov.

Na určenie optimálneho počtu klastrov bola použitá metóda „*Elbow diagram*“. Výsledok algoritmu *KCC* pre 9 úsekov (klastrov) je zobrazený na Obr. 7. Na základe algoritmu *KMC* bolo vyčlenených 6 kvázi – homogénnych celkov označených *A* až *F*. Tieto zároveň patria do dvoch hlavných častí. Do prvej časti patria celky *A, B, C (geneticky aluviálne sedimenty)* a do druhej časti trasy patria celky *E, F (geneticky deluviálne sedimenty)*. Časť *D* je bez násypov a v ďalšom postupe bola použitá len na overenie modelu, no nebola zahrnutá v procese „učenia“ modelov. Z dôvodu rozsiahlosti výstupov budú v príspevku prezentované len výsledky z časti *A – C*.

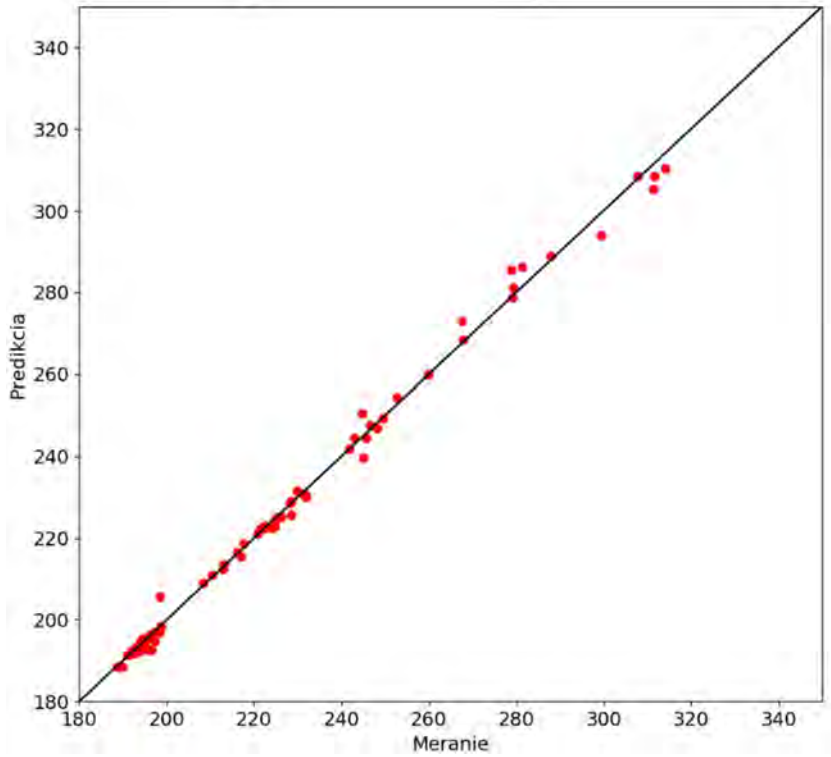
Pre jednotlivé úseky boli na základe konzistencie, homogenizovanej skupiny a genézy zemín stanovené oedometrické moduly a objemové hmotnosti pre potreby výpočtu sadania.



Obr. 7 Výsledok algoritmu KMC, výsledné vyčlenené úseky.
Fig. 7 Result of KMC clustering algorithm.

Regresný model na určenie úrovne hladiny podzemnej vody

Na určenie nadmorskej výšky hladiny podzemnej vody bol použitý algoritmus *ANN*. Ako vstupy boli použité polohopisné údaje *X, Y (m)* v systéme S-JTSK a nadmorská výška povrchu terénu *Z* (m n.m.). Pre učenie bolo použitých 75 % z celkového počtu 405 hodnôt, 25 % bolo použitých pre overenie modelu. Maximálna chyba, ktorú model urobil, bol rozdiel medzi nameranou a predikovanou hladinou o veľkosti 7,24 m. Priemerná chyba modelu bola na úrovni 1,99 m. Porovnanie medzi predikciou a meraním je znázornené na Obr. 8.



Obr. 8 Porovnanie medzi meraním a predikciou úrovne hladiny podzemnej vody (ANN).
Fig. 8 Comparison of measured and predicted (ANN) ground water level.

Klasifikačný model na určenie genézy zemín

Na určenie genézy zemín bol použitý a „natrénovaný" *RF* algoritmus. Vstupmi pre model sú polohopisné údaje *X, Y (m)* v systéme S-JTSK, nadmorská výška povrchu terénu *Z* (m n.m.), nadmorská výška v strede vrstvy Z_p (m n.m.), hĺbka stredu vrstvy h_p (m). V rámci parametrov algoritmu bolo nastavených 10 rozhodovacích stromov, vyrovnané váhy pre jednotlivé triedy a entropia ako kritérium optimalizácie. Pred zadaním vstupov pre model bol každý vrt rozdelený na vrstvy hrúbky 0,1 m. Počet údajov pre každú triedu genézy a oba úseky, po rozdelení na jednotlivé vrstvy, je uvedený v Tab. 1. V každom úseku bolo určených 35 % údajov na testovanie a 65 % údajov na učenie.

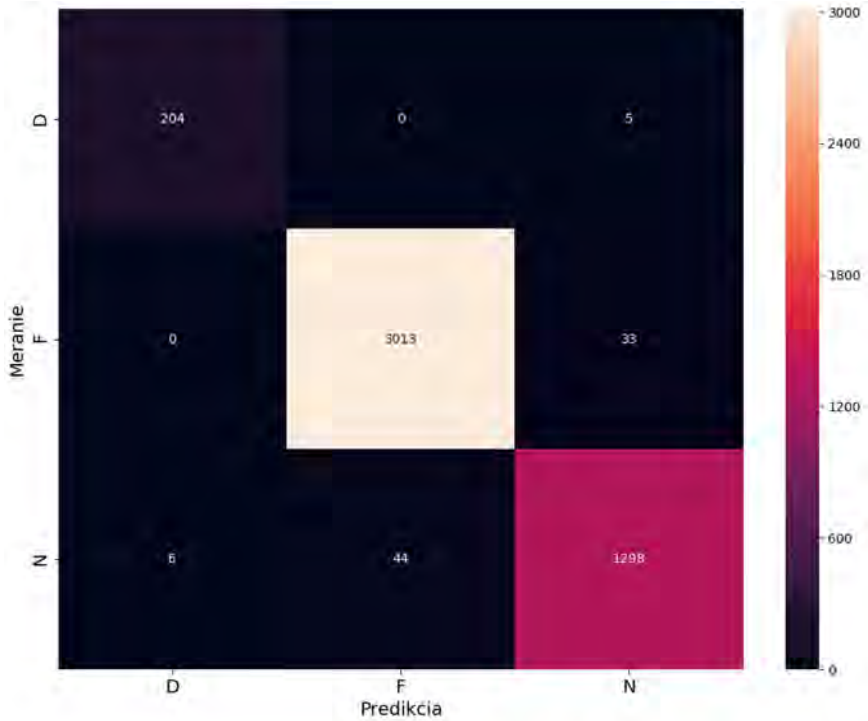
Tab. 1 Počet údajov vstupujúcich do modelu na určenie genézy zemín.
Tab. 1 Number of inputs for model of soil genesis.

	Úsek 1
F-fluviálne	8 700
N-neogén	3 860
D-delúvium	590
Spolu	13 150

Presnosť modelu je počítaná ako:

$$PRESNOSŤ=TP/(TP+FP) \quad (1)$$

kde *TP* je počet korektne priradených údajov a *FP* je počet údajov priradených inej triede.



Obr. 9 Matica zámen pre klasifikáciu genézy, úsek 1.
Fig. 9 Confusion matrix for soil genesis, part 1.

Tab. 2 Presnosť modelov pre určenie genézy.
Tab. 2 Accuracy of model for soil genesis.

Úsek 1

F-fluviálne	98.92%
N-neogén	96.29%
D-delúvium	97.61%
Celkovo	98.09%

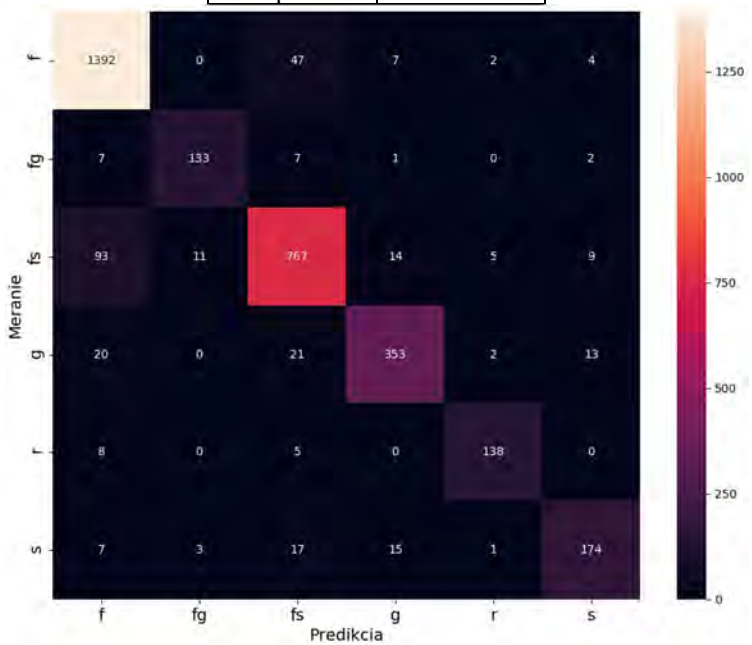
Klasifikačný model na určenie skupiny zemín

Na určenie skupiny zemín bol použitý a natrénovaný *RF* algoritmus. Vstupmi pre model sú polohopisné údaje *X, Y (m)* v systéme S-JTSK, nadmorská výška povrchu terénu *Z* (m n.m.), nadmorská výška v strede vrstvy Z_p (m n.m.), hĺbka stredu vrstvy h_p (m). V rámci parametrov algoritmu bolo nastavených 10 rozhodovacích stromov, vyrovnané váhy pre jednotlivé triedy a entropia ako kritérium optimalizácie. Pred zadaním vstupov pre model bol každý vrt rozdelený na vrstvy hrúbky 0,1 m. Počet údajov pre každú triedu skupiny a oba úseky, po rozdelení na jednotlivé vrstvy, je uvedený v Tab. 3. V každom úseku bolo určených 25 % údajov na testovanie a 75 % údajov na učenie. Matica zámen je znázornená na Obr. 10. Presnosť modelu pre určenie jednotlivých tried je spolu s celkovou presnosťou modelu pre zvolené úseky uvedená v

Tab. 4.

Tab. 3 Počet údajov vstupujúcich do modelu pre určenie skupiny zemín.
Tab. 3 Number of inputs for model with soil group.

	Úsek 1
f	5 801
fg	598
fs	3 595
g	1 642
r	559
s	915
Spolu	13 110



Obr. 10 Matica zámen pre klasifikáciu skupiny zemín, úsek 1.
Fig. 10 Confusion matrix for soil groups, part 1.

Klasifikačný model pre určenie konzistencie

Na určenie skupiny zemín bol použitý a natrénovaný *SVM* algoritmus a metodika „*bootstrap aggregation*“, so stratégiou „ *One vs. One*“ pre viac triedový klasifikačný problém. Vstupmi pre model sú polohopisné údaje *X, Y (m)* v systéme S-JTSK, nadmorská výška povrchu

terénu Z (m n.m.), hĺbka stredu vrstvy h_p (m), genéza a skupina zemín. V rámci parametrov algoritmu bolo nastavených 200 pod modelov (v rámci „*bootstrap aggregation*“), vyrovnané váhy pre jednotlivé triedy a parameter regulácie $C = 50$. V každom úseku bolo určených 20 % údajov na testovanie a 80 % údajov na učenie. Matica zámen je znázornená na Obr. 11. Presnosť modelu pre určenie jednotlivých tried je spolu s celkovou presnosťou modelu pre zvolené úseky uvedená v

Tab. 6.

Ako je možné vidieť, presnosť modelov na určenie konzistencie je výrazne nižšia, ako presnosť predošlých modelov. Je to najmä z dôvodu, že vrty neboli rozdelené na vrstvy hrúbky 0,1 m, ale boli použité vrstvy určené opisom vrtov v textovej dokumentácii. Takto je využitých menej údajov a model má menej vzorov pre „učenie“. V úseku 1 je celková presnosť modelu 64,29 %. Presnosť modelov je teda nižšia ako presnosť predošlých modelov, avšak model je dostatočný na použitie v rámci celkovej schémy riešenia.

Tab. 4 Presnosť modelov na určenie skupiny zemín.
Tab. 4 Accuracy of model for soil groups.

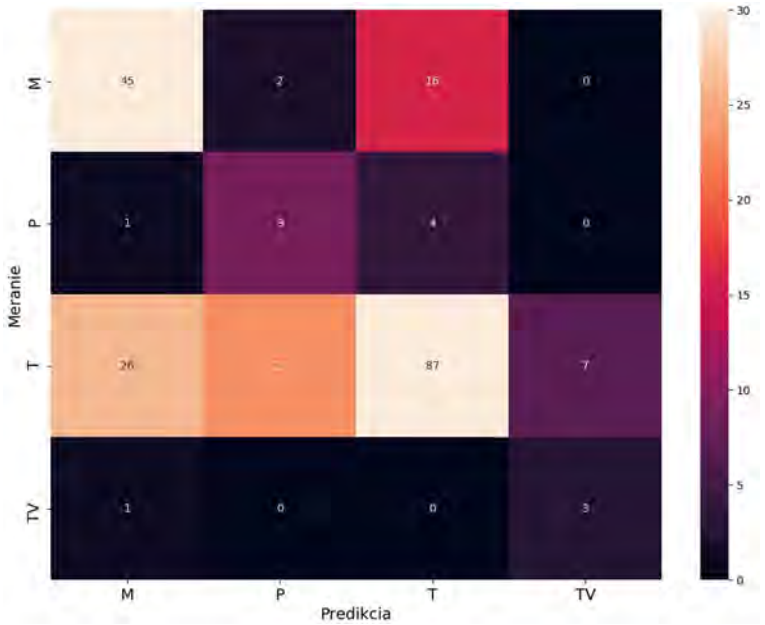
	Úsek 1
f	95.87%
fg	88.67%
fs	85.32%
g	86.31%
r	91.39%
s	80.18%
Spolu	90.20%

Tab. 5 Počet údajov vstupujúcich do modelu na určenie konzistencie.
Tab. 5 Number of inputs for model with soil consistency.

	Úsek 1
M-mäkká	330
T-tuhá	679
P-pevná	83
TV-tvrdá	28
Spolu	1 120

Tab. 6: Presnosť modelov na určenie konzistencie zemín.
Tab. 6: Accuracy of model for soil consistency.

	Úsek 1
M-mäkká	71.43%
T-tuhá	60.84%
P-pevná	64.29%
TV-tvrdá	75%
Spolu	64.29%



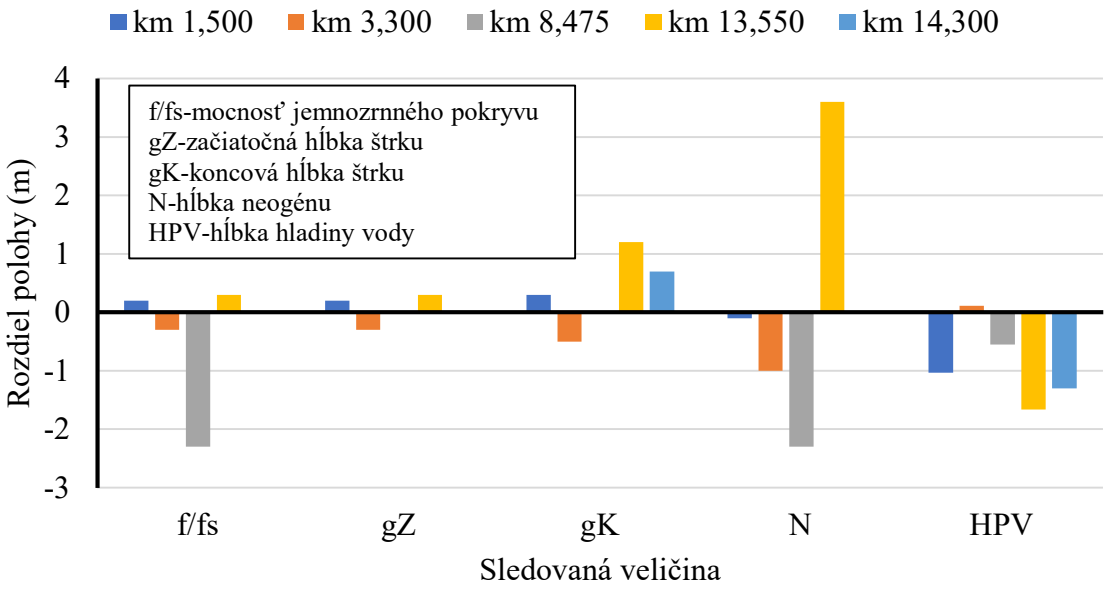
Obr. 11: Matica zámen pre klasifikáciu konzistencie zemín, úsek 1.
Fig. 11: Confusion matrix for soil consistency, part 1.

Porovnanie strojovo vytvorených profilov s profilmi inžinierskeho geológa

Porovnanie rozdielu hĺbky, sledovaných parametrov, medzi profilmi zostrojenými Miloslavom Kopeckým (*MK*) a strojovo (*ML*), je uvedené na Obr. 12. Ako je možné vidieť rozdiely jednotlivých hĺbok sú vo väčšine analyzovaných profiloch do rozdielu 2,0 m. Výnimkou je len zle stanovená hĺbka neogénneho podložia na konci hodnotenej trasy, kde je chyba približne 3,5 m. Neogénne podložie sa väčšinou v rámci trasy viaže na spodok štrkovej vrstvy, v prípade tejto úvahy je možné údaj o hĺbke neogénu považovať podľa hodnoty *gK*. V takomto prípade je rozdiel medzi strojovým modelom a modelom zostrojeným inžinierskym geológom približne 1,0 m. Druhou výnimkou sú rozdiely v km 8,475. Tu je však rozdiel prijateľný a preukazuje sa robustnosť použitej metodiky. V danom profile sa vo fáze „učenia“ natrénoval len model pre hladinu podzemnej vody. Model pre určenie genézy, skupiny zemín a konzistencie nebol v rádiuse 1,0 km od posudzovaného miesta „natrénovaný“. Napriek tomu sa dosiahla chyba len 2,0 m v určení hĺbky neogénu a deluviálneho pokryvu.

V rámci zostrojených profilov boli v určitých miestach rozdiely medzi stanovenou triedou, konzistenciou alebo oedometrickým modulom. Tieto rozdiely sú zanalyzované ich vplyvom na hodnotu maximálneho sadania podložia v osi násypu/diaľnice v zvolených profiloch. Maximálne vypočítané sadania podložia sú uvedené v Tab. 7. Ako je možné vidieť, tak aj v profile s najväčšími rozdielmi medzi zvolenými vrstvami podložia nie je percentuálny rozdiel medzi sadaním podložia zostrojeným strojovo a podľa inžinierskeho geológa väčší ako 20 %. Rozdiely v sadnutí podložia v profiloch, s relatívne malými odchýlkami medzi zostrojenými profilmi, prináležia odchýlkam v použitých oedometrických moduloch.

Uvedené rozdiely sú pre potreby analýzy v tejto správe prijateľné. Zároveň je možné konštatovať, že strojovo zostrojené profily dosahujú konštantne menšie hodnoty vypočítaných sadaní ako modely zostrojené inžinierskym geológom.



Obr. 12 Porovnanie rozdielu stanovenej hĺbky sledovaných parametrov.
Fig. 12: Comparison of profiles created by engineering geologist and machine profiles.

Tab. 7 Porovnanie vypočítaných sadaní v profiloch zostrojených inžinierskym geológom (MK) a v profiloch zostrojených strojovo (ML)
Tab. 7 Comparison of calculated settlements in ground models developed by engineering geologist (MK) and machine (ML).

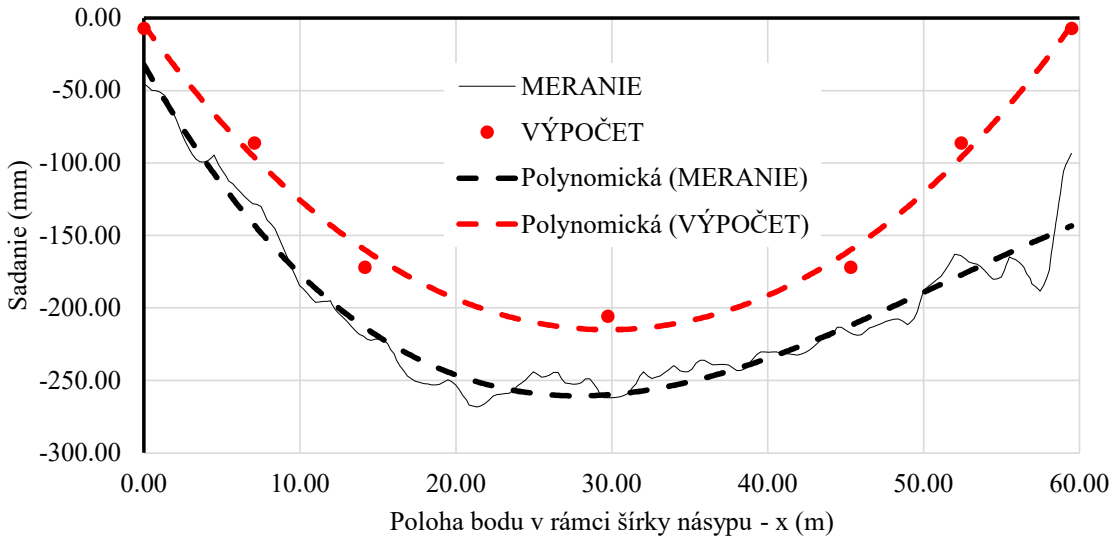
	MK	ML	ML/MK
	mm	mm	%
km 1.500	128.91	126.72	98.30
km 3.300	421.39	387.56	91.97

Porovnanie strojovo určeného sadania s nameraným sadaním

V 3 profiloch bolo pod násypmi realizované meranie sadania podložia násypu v horizontálnych inklinometroch. Porovnanie maximálnych sadaní nameraných v horizontálnych inklinometroch a vypočítaných pomocou zvolenej metodiky je uvedený v Tab. 8. Ako je možné vidieť všetky sadania, majú pomernú percentuálnu chybu medzi meraním a výpočtom do cca 20 %. Zároveň až na jeden prípad v mieste HINK-13 sú vypočítané sadania menšie ako sadania namerané. Porovnanie priebehu sadania s nameranými hodnotami je uvedené na Obr. 13. Z uvedeného porovnanie je možné vidieť, že vypočítané sadanie so strojovo zostrojeným modelom podložia, relatívne dobre vystihuje namerané hodnoty sadaní.

Tab. 8 Porovnanie nameraných a vypočítaných sadaní podložia násypov.
Tab. 8 Comparison of calculated and measured settlements.

Pozícia		HINK	ML	ML/HINK
		mm	mm	%
HINK-13	km 1.500	106.14	126.72	119.39
HINK-14	km 2.081	123.44	113.201	91.71
HINK-16	km 3.510	259.37	205.79402	79.34



Obr. 13 Vypočítané a namerané sadanie v mieste HINK-16, km 3,510.
Fig. 13 Comparison of calculated and measured settlements, HINK-16, km 3,510.

Poďakovanie

Príspevok je jedným z výstupov grantovej úlohy č. 1/0745/21 agentúry VEGA

4. Záver

Na základe uvedených výsledkov je možné konštatovať, že vytváranie modelov podložia na základe strojového učenia dosahuje dobrú presnosť v porovnaní s modelmi podložia, zostrojenými skúseným inžinierskym geológom. Na praktickej úlohe výpočtu sadania bolo demonštrované využitie prediktívneho modelu a jeho dobrá zhoda s výpočtami pre model podložia, vytvorený inžinierskym geológom.

Daná metodika môže výrazne zefektívniť proces analýzy, navrhovania a optimalizácie geotechnických konštrukcií. Uvedené postupy môžu poskytnúť kvantitatívne a rýchle analýzy pre rôzne spektrum geotechnických úloh. Zároveň je možné vytvorené modely priebežne počas realizácie geotechnických konštrukcií dopĺňať a spresňovať.

Podmienkou pre praktické využívanie uvedených metód v praxi je zavedenie štandardizovaných dátových výstupov z prieskumu. Štandardy by mali mať stanovený elektronický formát výstupu a jednotlivé parametre, ktoré musia takéto výstupy obsahovať. V prípade uvedených výstupov z inžinierskogeologického prieskumu by bolo potom možné napríklad vypočítať sadanie násypov na trase diaľnice s dĺžkou 15 km a krokom výpočtu každých 100 m v priebehu desiatok minút.

Zoznam literatúry

American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).* West Conshohocken, PA, 2017: ASTM International.

Breiman, L., 2001: Random Forests. *Machine Learning*, s. 5-32.

Cressie, N., 1990: The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, s. 239-252.

Cruz, M., Santos, J. M., Cruz, N., 2013: Estimating the Maximum Shear Modulus with Neural Networks. *Recent Trends in Applied Artificial Intelligence, Amsterdam, Netherlands*, s. 684-693.

Goh, A., Goh, S., 2007: Support vector machines: Thier use in geotechnical engineering as illsutrated using seismic liquefaction data. *Computers and Geotechnics, 34*, s. 410-421.

Chollet, F. a kol., 2015: Keras. *https://keras.io*.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Duchesnay, É., 2011: Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research, 12*, s. 2825-2830.

Samui, P., Sitharam, T, 2011: Machine learning modelling for predicting soil liquefaction susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 11*, s. 1-9.

Šapina, M, 2016: A Comparison of Artificial Neural Networks and Ordinary Kriging depth maps of the Lower and Upper Pannonian stage border in the Bjelovar Subdepression, Northern Croatia. *The Mining - Geology - Petroleum Engineering Bulletin* , s. 75-86.

Tsiaousi, D., Travasarou, T., Drosos, V., Ugalde, J., & Chacko, J, 2018: Machine Learning Applications for Site Characterization Based on CPT Data. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, COnference, Austin, Texas, V*, s. 461-472.

Vapnik, V. N, 1995: Statistics for Engineering and Information Science: The Nature of Statistical Learning Theory. *Springer, 2nd edition*, 314 s.

Yang, B., Yin, K. L., & Liu, Z, 2019: Time series analysis and long short-term memory neural network to predict landslide displacement. *Landslides*, s. 677-694.

Zhou, Y., & Wu, X, 1994: Use of Neural Networks in the Analysis and Interpretation of Site Investigation Data. *Computers and Geotechnics*, s. 105-122.

ANALÝZA STABILITNÝCH POMEROV V ŠIRŠOM CENTRE MESTA ILAVA

ANALYSIS OF STABILITY CONDITIONS IN THE WIDER CITY CENTER OF ILAVA

Roman Bulko[1], Filip Gago[2]

[1]Katedra geotechniky, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1,010 26 Žilina, Slovenská republika, e-mail: roman.bulko@uniza.sk
[2] Katedra geotechniky, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1,010 26 Žilina, Slovenská republika, e-mail: filip.gago@uniza.sk

Abstrakt: V prudkom svahu cca 30-34°v širšom centre v meste Ilava sa nachádzal starý elektrický stĺp. Za účelom výmeny tohto elektrického stĺpa bola zriadená dočasná prístupová komunikácia s dočasným sklonom 45 – 47°. Z vizuálnej obhliadky lokality bolo zistené, že predmetný svah je tvorený prevažne navážkou rôzneho obsahu. Navážka obsahovala kusy tehál, betónov, skla a dreva. Na presnejšie stanovenie druhu zeminy boli odobrané vzorky zemín. Tieto vzorky boli testované v geotechnickom laboratóriu na Žilinskej univerzite. Na predmetnom svahu bola následne posúdená celková stabilita v programe Plaxis 2D pomocou metódy konečných prvkov a programom Geo5. Pomocou programu Geo5 bola urobená analýza vplyvu zárezu na stabilitu svahu. Bolo navrhnuté trvalé riešenie, ktoré je na danú lokalitu dostupné, ekonomické a hlavne bezpečné.

Abstract: There was an old electric pole on a steep slope of about 30-34° in the wider centre of Ilava. To replace this electric pole, a temporary access road with a temporary inclination of 45 -47° was set up. From a visual inspection of the site, it was found that the slope in question is formed mainly by a landfill of various content. The landfill contained pieces of bricks, concrete, glass, and wood. Soil samples were taken to determine the type of soil more accurately. The soil samples taken were tested in the geotechnical laboratory at the University of Žilina. The overall stability was then assessed on the slope in question using the finite element method of the Plaxis 2D program and the Geo5 program. An analysis of the impact of the notch on the slope stability was performed using the Geo5 program. A permanent solution has been proposed that is feasible, economical, and, most importantly, safe for the site.

Kľúčové slová: stupeň stability, Plaxis 2D, metóda konečných prvkov, Geo5, sanácia

Keywords: stability factor, Plaxis 2D, finite element method, Geo5, remediation

1. Úvod

V stavebnom inžinierstve je stabilita svahov veľmi dôležitá a je potrebné ju riešiť nielen v prírodných, ale i v umelo vytvorených svahoch. Potreby ľudí sa zväčšujú a aj životný priestor ľudí sa rozmáha stále viac a viac. Či už sa to týka infraštruktúr, podnikov alebo rodinných domov. Stavebné pozemky v ideálnych podmienkach ubúdajú a ostávajú prakticky len pozemky s horšími podmienkami, ako sú napríklad stavby vo svahoch. Pokiaľ nastane porušenie stability svahu, vzniknú zosuvy. Zosuvy môžu byť nebezpečné pre život ľudí, ohrozenie majetku, fauny a flóry. Pri riešení stability svahov je potrebné nájsť kritickú šmykovú

plochu a určiť stupeň stability. Pri umelo vytvorených svahoch je cieľom optimálne navrhnutie sklonu. Tento článok má snahu vyhodnotiť vplyv zárezu na stabilitu svahu. Strmý svah sa nachádza v meste Ilava. Na korune svahu je postavená budova, ktorá priťažuje svah a je súčasťou Mierového námestia v centre mesta Ilava. V nižšej časti svahu je elektrický stĺp, ktorý bolo nutné vymeniť. Z tohto dôvodu si firma najatá na výmenu spravila vo svahu dočasnú príjazdovú cestu. Cieľom práce je overiť stabilitu svahu po tomto zásahu. Stabilita je overená v programoch Plaxis 2D a GEO5 a následne sú tieto výsledky porovnané. Analyzovali sme aj vplyv rozširovania zárezu na stabilitu predmetného svahu. Výstupom práce sú navrhnuté krátkodobé i dlhodobé opatrenia zabezpečenia stability svahu.

2. Inžinierskogeologická charakteristika územia

Svah sa nachádza v meste Ilava. Z hľadiska inžinierskogeologických pomerov sa Ilava rozprestiera na území fluviálnych sedimentov. Ide o najmladšie a plošne najrozšírenejšie fluviálne sedimenty vystupujúce v podobe dolinných nív riek a potokov. Postglaciálne náplavy nivných sedimentov vytvárajú jemnozrnný sedimentačný povrch piesčito-štrkových akumulácií riek. V suchých dolinách často kontinuálne prechádzajú do deluviálno-fluviálnych splachov. Sedimenty väčších riek sa často horizontálne menia a vytvárajú litologicky premenlivé súvrstvie. Smerom k aktívnemu toku sa nachádzajú aj resedimentované štrky a piesky. Nachádza sa tu aj tmavosivý až čierny horizont pochovanej nivnej pôdy. Hlinité, prachovité a ílovité sedimenty tvoria nadložie tejto pôdy. Sú plošne najrozšírenejšie a dominujú i v povrchovej vrstve nív menších tokov. Typickým znakom pre nivné sedimenty väčších tokov je výskyt karbonátov v podobe mikrokonkrécií a úlomkov. Farba vrchných sedimentov je sivá, tmavosivá až hnedosivá. Sedimenty menších tokov tvoria ílovité sivohnedé nevápnité hliny, piesčité hliny alebo piesky. V spodnej časti i úlomky hornín. Hrúbka sedimentov hlavných tokov nie je rovnaká, ale pohybuje sa od 1,5 až 3 m (obr. 1).

Obr. 1 Geologická skladba mesta Ilava (geology.sk)
Fig. 1 Geological composition of the city of Ilava (geology.sk)

Na lokalite sa nachádza prudký svah 30 – 34°, do ktorého bola zarezaná dočasná prístupová cesta so sklonom dočasného svahu 45 – 47° (1:1 – 1:1,07). Z geologického hľadiska sa lokalita nachádza na fluviálnych sedimentoch, charakteru piesčitých štrkov (geology.sk). Z dostupných archívnych materiálov (Digitálny archív ŠGUDŠ: č. úlohy: 17-1998-11) povrch územia je tvorený navážkou rôzneho zloženia, najmä však s prevahou stavebného odpadu, s ktorým sú zasypané bývalé pivnice. Mocnosť navážky sa pohybuje od 2,90 – 5,40 m. Navážka je nehomogénna, má neznámy pôvod a vek. Ďalšou zistenou vrstvou je íl strednoplastický prevažne mäkkej, menej pevnej konzistencie o overenej mocnosti 0,90 – 1,30 m (vrt J1). V zmysle STN 73 1001 hodnotíme zeminu ako súdržnú triedy F6 (tab. 1).

Ďalej sa nachádzajú nesúdržné sedimenty štrky s prímesou jemnozrnnej zeminy. Tieto sú sivobielej farby. Ich skelet tvoria slabo až stredne opracované obliaky plocho-oválneho tvaru. Zistený priemer obliakov sa pohybuje prevažne od 1 do 5 cm. Mocnosť štrkov bola overená minimálne 0,80 m. Súvrstvie štrkov je stredne uľahlé až uľahlé. V zmysle STN 73 1001 hodnotíme zeminu ako nesúdržnú triedy G3.

Tab. 1 Charakteristiky zemín z archívneho súboru č. úlohy: 17-1998-11
Tab. 1 Soil characteristics from archive report number task: 17-1998-11

Zemina	***E_{def} [MPa]***	***φ_u [°]***	***c_u [kPa]***
F6 mäkká konzistencia	*1,50*	*0*	*25*
F6 pevná konzistencia	*6,00*	*0*	*80*
G3	*100,00*	*32*	*0*

Z iného archívneho IG prieskumu v meste Ilava (evidenčné číslo 800/2018) boli zistené nasledovné charakteristiky (tab. 2):

Tab. 2 Charakteristiky zemín z archívneho súboru č. úlohy: 800/2018
Tab. 2 Soil characteristics from archive report number task: 800/2018

Zemina	***γ [kNm^{-3}]***	***E_{def} [MPa]***	***φ_{ef} [°]***	***c_{ef} [kPa]***	***ν***
F5-MI	*20,0*	*5,0-8,0*	*19-23*	*15-18*	*0,4*
F6-CI	*21,0*	*4,0-7,0*	*17-21*	*15-18*	*0,4*
F2-CG	*19,5*	*8,0-18,0*	*24-30*	*12-16*	*0,35*

Z archívneho HG prieskumu v meste Ilava (evidenčné číslo 86584/2006) boli zistené nasledovné charakteristiky:

0,0 – 1,5 Silt tmavohnedý, s úlomkami tehly, so štrkom, valúny do veľkosti 1-5cm, navážka,
1,5 – 2,0 Silt piesčitý s obsahom uhlíkov, mäkká konzistencia
2,0 – 11,0 Štrk piesčitý, hnedý, opracované valúny do veľkosti 1-3cm

Počas vizuálnej obhliadky svahu bolo zistené, že predmetný svah je tvorený prevažne navážkou rôzneho druhu. Navážka obsahuje kusy tehál, betónov, skla a dreva. Na presné stanovenie druhu zeminy boli počas obhliadky odobrané 2 vzorky zemín a bola vykonaná obhliadka svahových deformácií aj v hustom vegetačnom poraste. Vzorky zemín sa testovali v geotechnickom laboratóriu na Žilinskej univerzite.

Z výsledkov laboratórnych skúšok je zrejmé, že sa jedná o ílovitú zeminu s kusmi tehál, betónov, skla a dreva. Charakter vzorky zeminy č.1 hodnotíme v zmysle STN 73 1001 ako F2-CG íl štrkovitý – táto vzorka bola odobraná z miesta okolo vymeneného stĺpa. Charakter druhej vzorky zeminy zatrieďujeme v zmysle STN 73 1001 ako F6-CL íl s nízkou plasticitou – táto vzorka bola odobraná v mieste neporušeného svahu.

3. Výpočet stupňa stability pomocou metódy MKP

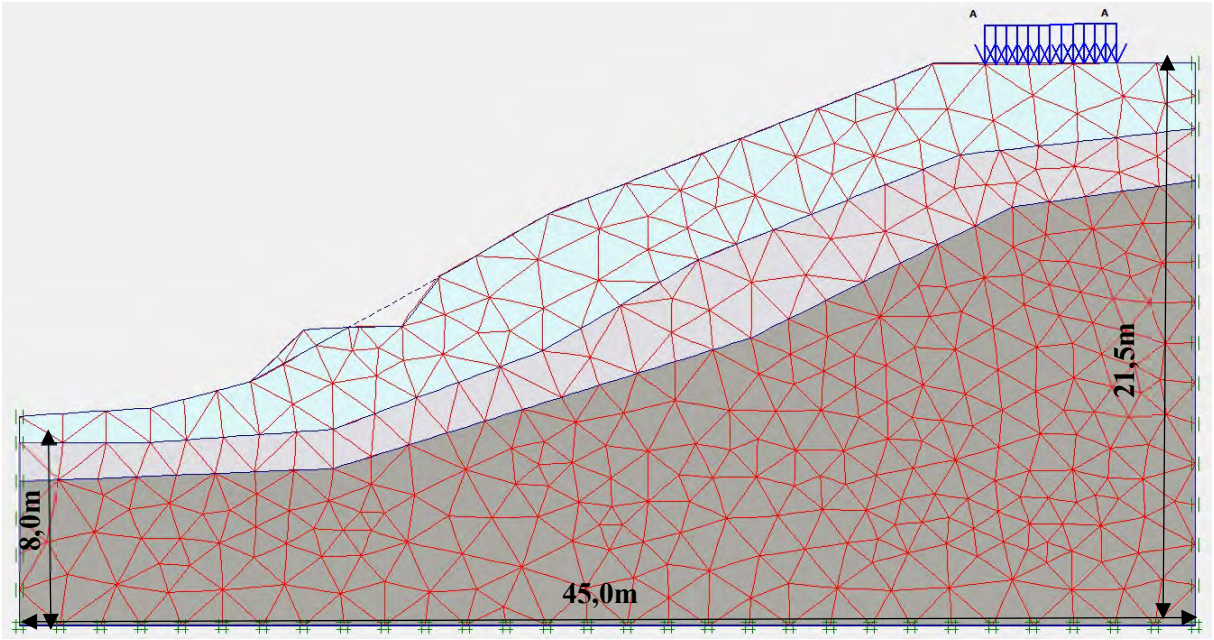
Poznatky o charaktere zeminy boli následne zahrnuté v statickom výpočte stability predmetného svahu. Na výpočet stability bol použitý program Plaxis 2D. Geometria povrchu predmetného svahu (obr. 2) bola zadaná podľa geodetického zamerania a podľa portálu zbgis.sk.

Tab. 3 Vstupné hodnoty vo výpočte stupňa stability
Tab. 3 Input values in the calculation of the degree of stability

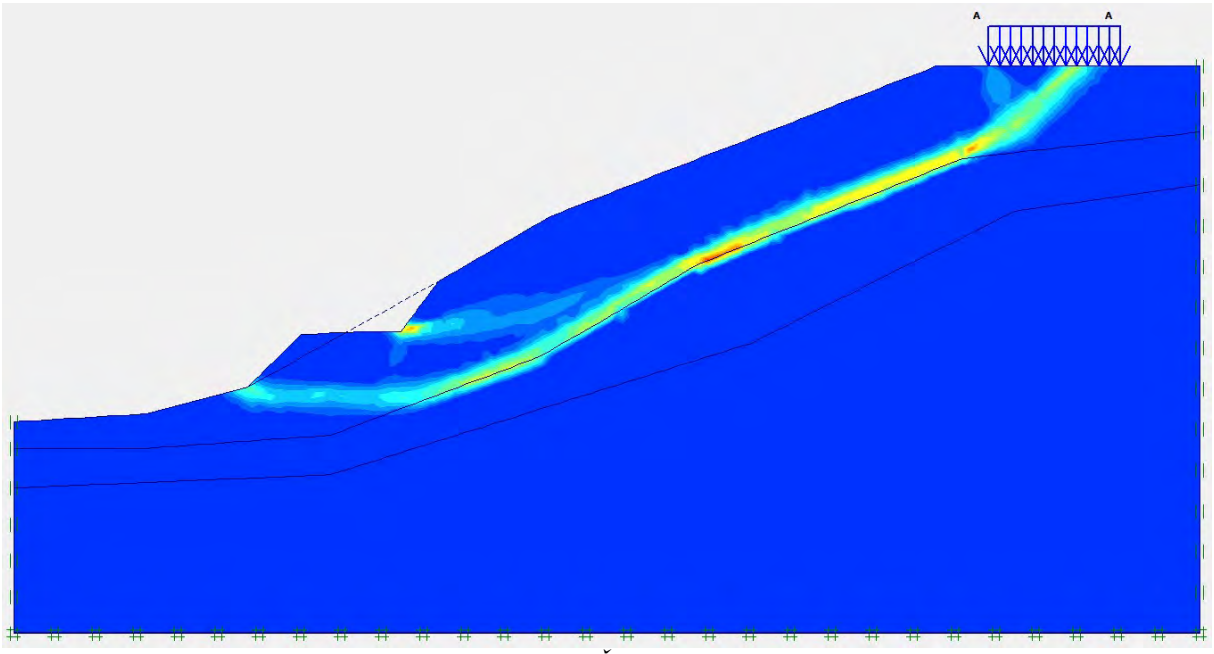
Zemina	***γ [kNm^{-3}]***	***E_{def} [MPa]***	***φ_{ef} [°]***	***c_{ef} [kPa]***	***ν [-]***
F6 (CL)	*21,0*	*4,0*	*17,0*	*15,0*	*0,40*
F2 (CG)	*19,5*	*8,0*	*24,0*	*12,0*	*0,35*
G3 (G-F)	*19,0*	*18,0*	*32,5*	*0*	*0,25*

Do výpočtu bola zahrnutá zemina typu F6-CL íl s nízkou plasticitou testovaná v geotechnickom laboratóriu Žilinskej univerzity. Podobný typ zeminy bol testovaný v archívnom súbore pod evidenčným číslom 800/2018. Smerné normové charakteristiky uvádzajú nasledovné hodnoty uhla vnútorného trenia v rozmedzí φ = 17 – 21° a kohézia v rozmedzí c = 20 – 40 kPa. S pohľadu bezpečnosti boli uvažované spodné hodnoty uhla vnútorného trenia a kohézie (archívny súbor). Horné priťaženie od existujúcej stavby bolo uvažované ako 15kN/m. Vstupné parametre obsiahnuté vo výpočte sa nachádzajú v tab. 3.

Vzhľadom na vypočítanú šmykovú plochu (obr. 3) a stupeň bezpečnosti môžeme tvrdiť, že zásah do predmetného svahu neohrozuje globálnu stabilitu celého svahu. Stupeň stability predmetného svahu po zásahu do svahu je F_S = *1,285*. Lokálna stabilita nebola ohrozená sklonom dočasného výkopu. 45 – 47° (1:1 – 1:1,07) ani jeho výškou. V norme STN 73 3050 sú prípustné sklony do 76°, resp. pomer 1:0,25. Vizuálna obhliadka nepotvrdila vznik lokálnych šmykových plôch.



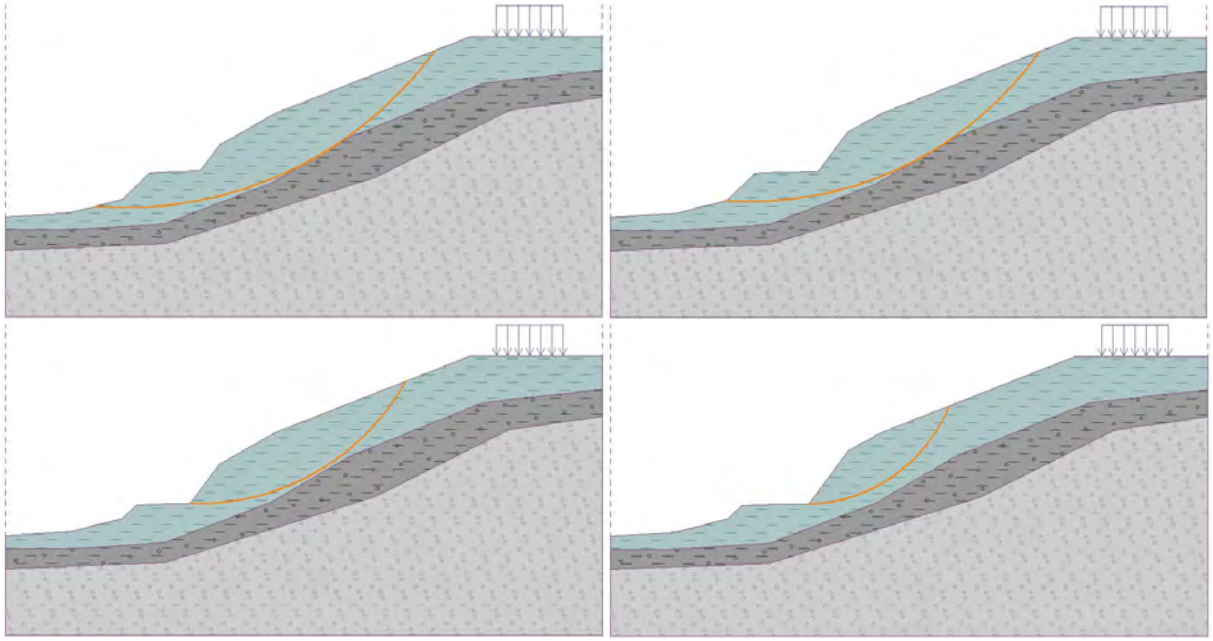
Obr. 2 Geometria posudzovaného svahu
Fig. 2 Geometry of the assessed slope



Obr. 3 Stabilita svahu – Šmyková plocha F_S=1,285
Fig. 3 Slope stability – Slip plane F_S = 1.285

4. Výpočet stupňa stability pomocou Geo5

Stabilitu svahu sme overili aj pomocou programu GEO5. Charakteristiky zeminy sme nemenili. Použili sme návrhový postup 2. Namodelovali sme viacero situácií (ako je vidieť na obr. 4) posudzovaného svahu a výsledky sme porovnali, z dôvodu presnejšieho overenia vplyvu zárezu na stabilitu svahov. V tabuľke 4 sa nachádzajú výstupy z programu Geo5 s hodnotami stupňa stability pre rôzne situácie s ktorými sme počítali. Stupeň stability bol vyšetrovaný na základe Bishopovej a Pettersonovej metódy.



Obr. 4 Výsledky šmykových plôch z programu GEO5
Fig. 4 Results slip plane from the GEO5 program

V prvom modeli je zobrazený svah s realizovaným zárezom. V druhom sme zárez rozšírili o jeden meter smerom do svahu, v treťom modeli sme svah rozšírili o jeden meter smerom nadol. A vo štvrtom modeli sme vyšetrili stabilitu svahu rozšírení o jeden meter smerom do svahu a smerom nadol.

Pri všetkých výpočtoch bola šmyková plocha vyšetrovaná pomocou optimalizácie Bishopovej metódy. Po určení šmykovej plochy bol dopočítaný stupeň stability v zmysle Pettersonovej metódy. Bishopova a aj Pettersonova metóda sa radia medzi metódy medznej rovnováhy. Jedná sa o prúžkové metódy výpočtu šmykovej plochy, kedy svah telesa rozdelíme na určitý počet dielikov a stanovíme silové pôsobenie od vlastnej tiaže a prípadného zaťaženia. Rozdiel medzi Bishopovou a Pettersonovou metódou je, že pri Pettersonovej metóde neuvažujeme so vzájomným pôsobením susedných elementov.

Tab. 4 Výsledky z programu GEO5
Tab. 4 Results from the GEO5 program

Metóda	***Stupeň stability Fs***				
	Bez zárezu	***So zárezom***	***Rozšírenie meter do svahu***	***Rozšírenie meter nadol***	***Rozšírenie meter do svahu a nadol***
Bishopova	*1,42*	*1,43*	*1,44*	*1,36*	*1,28*
Pettersonova	*1,37*	*1,39*	*1,40*	*1,33*	*1,26*

Z výsledkov z programu GEO5 je zrejmé, že realizovaný zárez výrazne neovplyvnil globálnu stabilitu svahu. Dokonca jeho vplyv mierne zlepšil stabilitu svahu vykonaného zárezu. Zo zvyšných výsledkov sme zistili, že zásahy do svahu ovplyvňujú celkovú stabilitu svahov. Zárez posunutý meter do svahu ešte mierne zlepšil stupeň stability, zárez posunutý o meter nižšie znížil stupeň stability oproti pôvodnému svahu. Najväčší vplyv mal samozrejme zárez posunutý aj meter do svahu aj meter nadol. Z výsledkov vidíme, že stupeň stability sa zmenšuje, ak sa zárezom približujeme smerom k šmykovej ploche. Je to spôsobené zväčšovaním úbytku hmoty nad pätou šmykovej plochy.

Tab. 2 Výsledky pre porovnanie programov
Tab. 3 Results for comparing programs

Metóda výpočtu	***Stupeň stability svahu Fs s pôvodným zárezom***
Plaxis 2d – MKP	*1,29*
Geo5 – Bishop	*1,43*
Geo5 – Petterson	*1,39*

Pri porovnaní výsledkov z programov Plaxis 2D a GEO5 (tab. 5) vidíme, že v tomto prípade je metóda konečných prvkov (Plaxis 2D) na strane bezpečnosti a stupeň stability je nižší, ako pri Bishopovej a Pettersonovej metóde. Hlavnou myšlienkou experimentu bolo porovnanie metód stability svahu a navrhnutých variantov riešenia stability zárezu.

5. Navrhované dostupné riešenie

Požiadavka bola, aby navrhované riešenie bolo na danú lokalitu dostupné, ekonomické a hlavne bezpečné. V súbehu týchto požiadaviek urobíme nasledovné kroky. Ako prvé vyspádujeme existujúce koľaje po stopách vozidiel (obr. 5), aby sa nám v predmetnom svahu neakumulovala dažďová voda. Následne potrebujeme skonsolidovať svah do rovnovážneho stavu. Bezpečný stav svahu zabezpečíme tak, že na odkopanú stranu svahu navezieme podobný typ zeminy, a to F2 až F6 (z pohľadu dostupnosti materiálu) v jednotlivých etapách tak, aby max. hrúbka vrstvy bola 25 cm a následne túto vrstvu zhutníme. Takto budeme pokračovať až do finálnej vrstvy. Vyžaduje sa nový povrch zatrávniť trávovým semenom, na lepšiu lokálnu stabilitu svahu. Nepoužijeme existujúcu odkopanú zeminu, ktorou sme zasypali kríky a iný materiál, ktorý sa nachádzal v päte svahu, resp. za existujúcou garážou.

Obr. 3 Koľaje na dočasnej príjazdovej cesty
Fig. 5 Tracks on the temporary access road

Podľa statického výpočtu šmyková plocha končí tesne na päte terajšieho nasypaného materiálu. Je teda vhodné, aby tento materiál podporujúci stabilitu ostal na svojom mieste do času, kým neprebehne konsolidácia násypu a následne po ukončení konsolidácie sa tento materiál môže odťažiť a svah sa dá do finálnej podoby – približne rovnakého tvaru ako pred jeho zásahom. Podľa navrhovaného riešenia sa upraví už zasypaný svah v okolí vymeneného stĺpa.

6. Záver

V tomto článku boli prezentované stabilitné pomery problémov svahu v meste Ilava po zásahu do svahu. Pri výmene stĺpa elektrického vedenia bola zhotovená dočasná príjazdová cesta. Boli posúdené stabilitné pomery z globálneho aj lokálneho hľadiska metódou konečných prvkov pomocou programu Plaxis 2D a metódou medznej rovnováhy pomocou programu Geo5. Z výsledkov je zrejmé, že svah je aj po zásahu stabilný a bolo preukázané, že metóda konečných prvkov dosahuje mierne nižšie stupne stability a teda je na strane bezpečnosti. Zrealizovaním návrhu trvalého riešenia svahu sa nevhodný zásah eliminuje a svah sa dostane do svojej prirodzenej rovnováhy.

Poďakovanie

Príspevok je jedným z výstupov projektu grantovej agentúry VEGA č. 1/0484/20 „Experimentálna a numerická analýza podkladových vrstiev z penobetónu vystužených geosyntetikou“.

Príspevok je jedným z výstupov projektu grantovej agentúry VEGA č. 1/0879/21 „Formulácia pokročilých konštitučných modelov zemín na báze neurónových sietí“.

Zoznam literatúry

Drusa, M., Vlček, J., Gago, F., Bulko, R., 2019: Moderné metódy navrhovania geotechnických konštrukcií. EDIS, ISBN 978-80-554-1640-3.

Harabinová, S., Kotrasová, K., Kormaníková, E., Hegedüsová, I., 2021: Analysis of Slope Stability. In: Civil and Environmental Engineering, Volume 17 (2021): Issue 1 (June 2021)

Súľovská, M., Stacho, J., 2021: Analysis of Geogrid Reinforced Structures with a Passive Facing System Using Different Computational Methods. In: Civil and Environmental Engineering, Volume 17 (2021): Issue 2 (December 2021)

Sitányiová, D., Mužík, J., 2006: Využitie GIS pre hydrologický prieskum zosuvných území a prípravu vstupných dát pre numerický model prúdenia podzemnej vody. In: Civil and Environmental Engineering. ISSN 1336-5835 Vol. 2, No. 1 (2006), s. 25-31

Gago, F., Mužík, J., Bulko, R., 2019: The slope stability solution using meshless local Petrov-Galerkin method. In: TRANSCOM 2019 [electronic] : conference proceedings. – ISSN 2352-1465. – 1. vyd. – Amsterdam: Elsevier Science, 2019. – s. 686-693

STN 72 1001: 2010 Klasifikácia zemín a skalných hornín.

STN 73 3050:1999 Zemné práce. Všeobecné ustanovenia.

https://zbgis.skgeodesy.sk/mkzbgis/sk/kataster

https://www.geology.sk/geoinfoportal

https://www.geology.sk/sluzby/digitalny-archiv/

VPLYV ZMIEN KLIMATICKÝCH POMEROV NA PRÍRODNÉ PROSTREDIE HLBINNÉHO ÚLOŽISKA VYSOKO RÁDIOAKTÍVNYCH ODPADOV

THE CONSEQUENCES OF THE CLIMATIC CHANGES ON THE ENVIRONMENT OF THE GEOLOGICAL REPOSITORY OF THE HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE

Miloš Kováčik

EN-GEO Consult, s.r.o., Zadunajská cesta 6, 851 01 Bratislava, Slovenská republika
e-mail: miloskovacik55@gmail.com

Abstrakt: Funkčnosť a bezpečnosť hlbinného úložiska rádioaktívnych odpadov je požadovaná na extrémne dlhú dobu, ktorá ďaleko presahuje časový horizont striedania glaciálov a štadiálov. Vznik pevninského ľadovca a permafrostu významne ovplyvňuje javy a procesy prebiehajúce v prírodnom, geologickom prostredí. Meniaca sa klíma spôsobuje viaceré významné komplikácie pre hlbinné úložisko, a tým zvyšuje nároky na bezpečnostné analýzy. Je zrejmé, že miesto úložiska mimo predpokladaného dosahu pevninského ľadovca prináša viacero výhod. V teplejších obdobiach po rozpustení ľadu dochádza vplyvom odľahčenia ku krehkému porušeniu hornín, zemetraseniam, zmenám pobrežnej čiary a zmenám napätostného stavu horninového masívu v potenciálnej hĺbke úložiska. Spoľahlivá predikcia a modelovanie budúcich klimatických pomerov v časovom horizonte stotisícov rokov je preto nevyhnutná.

Abstract: The functionality and safety of a deep repository for radioactive waste is required for an extremely long time, which far exceeds the time horizon of alternation of glacial and stadial cycles. The formation of the continental glacier and permafrost significantly affects the phenomena and processes taking place in the natural, geological environment. The changing climate causes several significant complications for the repository, thus increasing the demands for its performance assessment. It is obvious that the location of the repository outside the expected range of the continental glacier has several advantages. In warmer periods, ice melting rebound leads to brittle rock failure, earthquakes, changes in the coastline and changes in the stress state of the rock mass in the potential depth of the repository. Reliable prediction and modelling of the future climate conditions over a period of hundreds of thousands of years is therefore essential.

Kľúčové slová: hlbinné úložisko, doba ľadová, permafrost, CO_2, scenáre vývoja klímy

Key words: geological repository, ice age, permafrost, CO_2, climatic scenarios

1. Úvod

Hlbinné (geologické) úložisko vysoko rádioaktívnych odpadov a vyhoreného jadrového paliva je mimoriadne stavebné dielo. Funkčnosť a bezpečnosť diela je požadovaná na extrémne dlhú dobu, ktorá presahuje striedania dôb ľadových a medziľadových. Funkčnosť a bezpečnosť je chápaná z dvoch hľadísk. Jednak fungovanie úložiska ako systému počas doby jeho prevádzky a tiež z hľadiska bezpečnosti fungovania inžinierskych a prírodných bariér, ktoré majú zadržať alebo aspoň spomaliť migráciu rádionuklidov do životného prostredia. Bezpečnostnou požiadavkou je zabránenie úniku rádioaktívnych látok do životného prostredia na obdobie až jedného milióna rokov. Toto časovo dlhé obdobie je dané veľmi dlhým polčasom rozpadu viacerých rádionuklidov, ktoré sa nachádzajú vo vysoko rádioaktívnom odpade a vyhorenom jadrovom palive.

V súčasnosti je len niekoľko málo krajín využívajúcich jadrovú energiu na mierové účely, ktoré už začali budovať vlastné úložisko RAO, resp. majú blízko k dokončeniu jeho projektovania (Fínsko – Olkiluoto, Švédsko – Forsmark, Francúzsko – Bure). Ostatné krajiny, vrátane Slovenska, sú ešte v málo rozvinutom štádiu výskumu a vývoja ich národného hlbinného úložiska, resp. tieto aktivity boli dočasne pozastavené.

Obecne možno povedať, že úložisko vysoko rádioaktívnych odpadov tvoria dve jeho základné časti – podzemná časť so systémom šácht, štôlní a úložných vrtov a povrchová časť, pozostávajúca zo stavebných objektov na prijímanie, úpravu a transport odpadu do hĺbky, povrchových komunikácií a iných servisných objektov. Predpokladá sa, že po uvedení úložiska do prevádzky bude odpad ukladaný do podzemia počas niekoľkých desaťročí. Bude to závisieť od množstva existujúceho odpadu, jeho priebežnej produkcie, likvidácie existujúcich rádioaktívnych zariadení a pod. Prakticky všetky národné koncepty prípravy hlbinného úložiska predpokladajú postupné budovanie úložných priestorov (polí) v závislosti od ich potreby v budúcnosti. Po uložení všetkého odpadu, vyplnení podzemných priestorov a istom prechodnom období má byť úložný systém monitorovaný a až nakoniec bude bez inštitucionálnej kontroly.

Podľa litologického typu geologického prostredia (napr. granitoidy, sedimentárne horniny – ílovce, íly, kamenná soľ) sa za optimálnu hĺbku pre hlbinnú časť úložiska pokladá hĺbka 300-500 m. Táto hĺbka vychádza z bezpečnostných rozborov a modelovania rýchlosti možnej migrácie uvoľnených rádionuklidov z miesta uloženia na povrch. Do úvahy sa berú tiež možné zmeny hĺbky úložiska vplyvom vertikálnych pohybov zemskej kôry (výzdvih), erózie a denudácie povrchu a pod. Väčšia hĺbka znamená exponenciálny nárast finančných nákladov na prieskum a vybudovanie úložiska, zníženie preukaznosti geologického prieskumu, ako aj neželaný nárast teploty prostredia. Celý proces vyhľadania vhodných lokalít, výberu najoptimálnejšieho miesta, projektovania a vybudovania úložiska je extrémne komplexný proces, vyžadujúci si prácu inštitúcií a tímov odborníkov, ktorá trvá minimálne niekoľko desaťročí. Keďže ide o finančne mimoriadne nákladný proces (rádovo v miliardách €), väčšina krajín prevádzkujúcich jadrové elektrárne váha s vybudovaním vlastných úložísk, resp. v súčasnosti nie sú ochotné investovať veľké finančné prostriedky na zariadenie, ktoré bude potenciálne v prevádzke o niekoľko desaťročí. Časť odborníkov očakáva, že v dnešnej dobe nevyužiteľný odpad bude môcť byť použiteľný v nových typoch reaktorov, bude sa dať prepracovať za prijateľnejšie náklady, ako je tomu doteraz, resp. viaceré krajiny sa dohodnú na spoločnom úložisku. V súčasnosti je však politicky a legislatívne nemožné, aby takýto spoločný projekt vznikol. Keďže politický a spoločenský vývoj krajín je takmer nemožné predikovať na niekoľko desiatok rokov vopred, spoľahnutie sa na uloženie vysoko rádioaktívneho odpadu v cudzej krajine je z dnešného pohľadu nemysliteľné. Osobitnou kapitolou je odpor obyvateľov v dotknutých územiach, protesty ochranárskych združení a pod. Z etického hľadiska je ale tiež neprijateľné, aby dnešné

generácie ľudí využívali výhody jadrovej energetiky (napr. veľké zásoby surovín, bezuhlíková výroba elektrickej energie, relatívne nízke náklady na prevádzku a pod.) a prenechali riešenie odpadu na budúce generácie. Vysoko rádioaktívny odpad a vyhorené jadrové palivo reálne existuje a je potrebné sa týmto zaoberať.

2. Vplyv zmien klimatických pomerov na javy a procesy v geologickom prostredí

Dlhodobá bezpečnosť a funkčnosť hlbinného úložiska po jeho uzatvorení sa predpokladá v časovom horizonte až jedného milióna rokov. Je to pomerne dlhé časové obdobie, počas ktorého prebiehajú viaceré geologické a morfologické procesy, ktoré môžu mať na úložisko priaznivé, neutrálne, resp. nepriaznivé vplyvy.

Ľudstvo v súčasnosti čelí bezprecedentnej rýchlej globálnej zmene klímy. Počas celej histórie Zeme je klíma jedným z určujúcich faktorov formovania povrchu územia, charakteru vegetácie, riečnej siete, režimu a obehu povrchovej a podzemnej vody, charakteru zvetrávania, tvorby pôdneho pokryvu atď.

Podľa dnešnej úrovne poznania veda identifikuje 5-6 veľkých dôb ľadových za obdobie posledných cca troch miliárd rokov. Pravdepodobne najchladnejším obdobím bola neoproterozoická éra (obdobie pred 720-635 miliónmi rokmi), kedy Zem bola úplne pokrytá snehom („Snowball Earth“). Posledná doba ľadová *vo vrchnom kenozoiku* (Late Cenozoic Ice Age) so začiatkom vo vrchnom paleogéne začala pred cca 34 mil. rokmi. Jej najvýraznejším prejavom bolo pevninské zaľadnenie na južnej pologuli (Antarktída). Doteraz poslednou fázou vrchnokenozoickej doby ľadovej je kvartérne zaľadnenie, ktoré sa rozšírilo aj na severnú pologuľu. V súčasnosti sa za začiatok kvartéru považuje doba pred 2,58 mil. rokmi. Od stredného pleistocénu sa jednotlivé klimatické cykly (striedanie teplých a chladných cyklov) objavovali s periódou cca 100 tisíc rokov. Posledné glaciálne obdobie – obdobie s výrazným zaľadnením severnej pologule – bolo v období pred cca 115 až 12 tisíc rokmi. Dnešná medziľadová doba (*holocén*) – doba od posledného zaľadnenia na severnej pologule – trvá 11 700 rokov. Poznatky z výskumu dôb ľadových a medziľadových napovedajú, že nasledovné zaľadnenie by malo na severnej pologuli nastať za zhruba 50 tisíc rokov. Výpočet je odvodený z Milankovičových cyklov (periodických zmien orbity okolo Slnka a sklonu rotácie Zeme okolo vlastnej osi). Najnovšie prognózy hovoria, že antropogénne ovplyvnenie atmosféry (zvýšenie obsahu skleníkových plynov – CO_2, metánu a vodnej pary) môže prevýšiť vplyvy orbity a sklonu rotácie Zeme, teda, že budúce „pravidelné“ zaľadnenie na severnej pologuli vôbec nenastane alebo bude len nepatrné.

Základné meteorologické veličiny, ako napríklad teplota vzduchu alebo zrážky z minulosti vieme analyzovať z organogénnych, morských, limnických alebo eolických sedimentov, z vrtných jadier ľadu z ľadovcov a z meraní v hlbokých vrtov (Pollack, 2000). V dnešnej dobe podstatná väčšina odborníkov z radov klimatológov, geológov, biológov a iných pripúšťajú, resp. tvrdia, že za extrémne rýchlym otepľovaním vidia okrem prírodných príčin predovšetkým činnosť človeka, najmä spaľovanie fosílnych palív, čím sa zvyšuje množstvo CO_2 v ovzduší. Kým v predindustriálnej ére bol obsah CO_2 v atmosfére cca 280 ppm, v dnešnej dobe je to 418,8 ppm (Mauna Loa, marec 2022). Je prakticky nemožné predpovedať presný vývoj klímy z dlhodobej perspektívy (cca 100 tisíc rokov a viac). Je však možné vytvorenie klimatických scenárov (modelov), ktoré sú založené na poznaní zmien klímy v minulosti, najmä z posledného geologického obdobia – v kvartéri. Významným aspektom klimatických scenárov je zemepisná šírka lokality, tiež či ide o severnú alebo južnú pologuľu, polohu vo vnútrozemí, resp. pri mori (oceáne), aká je nadmorská výška, či je klíma lokality ovplyvňovaná teplými alebo studenými morskými prúdmi a pod.

Klíma má priamy a nepriamy vplyv na mnohé javy a procesy v prírodnom prostredí – na morfologický vývoj, režim a obeh povrchových a podzemných vôd, hydrogeochemické

parametre vôd, vznik/zánik a dosah zaľadnenia, vznik a rozsah permafrostu, rýchlosť denudácie povrchu územia, zmeny geotermického gradientu (zmeny teploty horninového prostredia so zmenou hĺbky) a iné.

Pevninský ľadovec v dobách posledných zaľadnení nedosiahol na územie Slovenska a ani Česka (Nývlt, 2015). Počas maximálneho zaľadnenia v poslednom glaciáli (MIS 2) sa čelo severoeurópskeho ľadovcového štítu zastavilo na línii Berlín – Varšava (Marks, 2002). K severným hraniciam SR a ČR sa pevninský ľadovec dostal počas starších glaciálov MIS 16, 12 a 6 (podľa názvoslovia používaného v alpskej oblasti: günz, mindel a riss). Všetky relevantné klimatické modely predpokladajú, že táto hranica určite nebude v budúcnosti južným smerom prekonaná. Vo vzťahu k uvažovanému úložisku sa to javí ako výhoda. Napr. v Škandinávii dosahoval počas posledných dvoch fáz glaciálu MIS 2 (podľa názvoslovia používaného v severnej Európe: Late Weichselian) a MIS 4 (Middle Weichselian) hrúbku 2000 – 2450 m (Brandefelt, 2014). Počas maxima posledného zaľadnenia MIS 2 (zhruba pred 20 tisíc rokmi) bola úroveň hladiny svetového oceánu o 120-135 m nižšia oproti dnešku, keďže veľké množstvo vody bolo viazaná v kontinentálnych ľadovcoch najmä v Kanade, USA, Grónsku a v Škandinávii (Yokoyama, 2000). Ich možné čiastočné alebo úplne roztopenie v horizonte desiatok až niekoľko stoviek rokov indikuje viaceré významné komplikácie vo vzťahu k hlbinnému úložisku. Veľká masa ľadu počas posledného glaciálu spôsobila, že horninový blok Škandinávie (Fennoscandia) bol váhou nadložia zatlačený do poloviskóznej zemskej kôry. Následkom odľahčenia po ústupe ľadovca (post-glacial rebound) sa celý blok vyzdvihuje rýchlosťou 4-11 mm/rok, pričom najvyššie hodnoty dosahuje v centrálnej časti Škandinávie. Len na porovnanie, diferenciálne vertikálne pohyby na našom území v kotlinových oblastiach sú rádovo desatiny mm/rok. Maximálny výzdvih v centrálnej časti Škandinávie od maximálnej fázy zaľadnenia (MIS 2) je vypočítaný na 500-800 m (Brandefelt, 2014). Vyklenovanie bloku kryštalinických hornín vplyvom odľahčenia následne spôsobuje krehké porušenia hornín, zemetrasenia menšej intenzity, výrazné zmeny pobrežnej čiary, režimu a obehu podzemných vôd vplyvom otvárania sa puklín a vzniku nových, tlaku podzemnej vody, zmeny hydrogeochemických parametrov a napätostného stavu horninového masívu v potenciálnej hĺbke úložiska. Zhruba 2 km nadložného ľadu v Škandinávii počas glaciálneho maxima spôsobilo navýšenie vertikálneho napätia v horninovom masíve o 20 MPa. Po roztopení ľadu dochádza k postupnému uvoľňovaniu napätia a redistribúcii horizontálnych napätí pozdĺž tektonických zlomov.

V podmienkach strednej Európy, ktorá je relatívne ďaleko od mora a zaľadnenie kontinentálnym ľadovcom nehrozí, nie je väčšina týchto nepriaznivých javov relevantná. Ako už bolo spomenuté vyššie, všetky súčasné klimatické modely predpokladajú, že v podmienkach strednej Európy nebude počas budúcich glaciálov zaľadnenie pevninským ľadovcom. Dokonca aj v Škandinávii klimatické modely predpovedajú, že zaľadnenie bude podstatne menšie ako tomu bolo v minulých fázach alebo dokonca bude úplne absentovať.

Glaciálne obdobie je charakterizované veľmi suchou (aridnou) klímou s priemerom ročných zrážok do 100 mm/rok, väčšinou len mechanickým zvetrávaním hornín, absenciou riečnej siete, výrazným znížením hladiny svetového oceánu (počas MIS 2 až o 120 m) a pod. Dlhodobá teplota vzduchu pod bodom mrazu je predpokladom pre vznik permafrostu. Permafrost (dlhodobo zamrznutá pôda) môže zasahovať do hĺbok niekoľko desiatok až stoviek metrov od povrchu a môže sa prejavovať viacerými spôsobmi. V súčasnosti je trvalo zamrznutá prevažná časť povrchu Aljašky, kanadských severských ostrovov a východnej Sibíri. Maximálna hĺbka dosahu permafrostu v súčasnosti bola nameraná medzi riekami Lena a Jana, a to približne 1 500 m.

Hĺbka premrznutia počas budúceho glaciálu je dôležitá veličina pre posudzovanie bezpečnosti HÚ. Vzhľadom k zemepisnej šírke strednej Európy sú takéto hĺbky premrznutia vylúčené, a to aj za predpokladu, že by sa v budúcnosti znížil, prípadne aj zastavil otepľujúci

vplyv Golfského prúdu na Európu. Betónové stavebné prvky hlbinnej časti úložiska a bentonitová obálka nesmú byť dlhodobo vystavené teplotám pod bodom mrazu, keďže spôsobuje degradáciu materiálu. Ako uvádza Zeman (1992), v hlbinnom vrte Blahutovice-1 boli identifikované dôkazy dosahu permafrostu počas posledného zaľadnenia v hĺbke 242 m. Túto hĺbku možno považovať za maximálnu aj pre oblasti s potenciálom vybudovania HÚ na Slovensku. Skôr však hĺbka bude oveľa menšia. Predpokladá sa, že permafrost, pokiaľ nezasiahne do hlbinnej časti úložiska, bude nepriamo pôsobiť pozitívne na jeho bezpečnosť. Vrstva trvalo zmrznutej pôdy zamedzí, prípadne podstatne zníži prienik vody do hĺbky, a tým v podstate zastaví prúdenie podzemnej vody. Toto je zrejme najpodstatnejší vplyv vo vzťahu k hlbinnému úložisku, pretože práve prúdenie podzemnej vody je jediným významným procesom, ktorý môže dopraviť potenciálne uvoľnené rádionuklidy z priestoru úložiska do biosféry. Rovnako pozitívnym aspektom je aj očakávaná aridná klíma s ročnými zrážkami blízko 100 mm/rok.

3. Záver

Klíma na našej planéte podlieha neustálej zmene. Tak tomu bolo počas celej jej histórie. V súčasnosti sme vo fáze globálneho otepľovania, pričom emisie skleníkových plynov na tomto procese majú nezanedbateľný podiel. Podľa najnovších záverov medzivládneho panelu pre zmenu klímy (IPCC) bude veľkosť týchto zmien v prvom rade závisieť of koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére. Hlbinné úložisko rádioaktívnych odpadov je výnimočné stavebné dielo, ktoré svojou funkčnosťou a požiadavkami na dlhodobú bezpečnosť nemá obdobu. Požiadavka na funkčnosť a bezpečnosť hlbinného úložiska až jeden milión rokov presahuje niekoľko cyklov glaciálov a štadiálov. Je všeobecne prijímané, že priemyselná činnosť človeka podstatne akceleruje klimatickú zmenu. Posledný vývoj potvrdzuje, že táto zmena – otepľovanie planéty sa neustále zrýchľuje, pričom tento trend sa nedarí stabilizovať. Modelové simulácie sa zhodujú na skutočnosti, že súčasný štadiál bude veľmi dlhý (Nývlt, 2015; Brandefelt, 2014). Predpovede sú založené na poznaní klimatických zmien v minulosti a matematickom modelovaní budúceho vývoja klímy na Zemi. Matematické modely sú však zaťažené veľkou mierou neistoty, keďže vývoj klímy je neobyčajne zložitý systém, ktorého mnohé súčasti sú len ťažko predikovateľné.

Berúc do úvahy najnovší spoločenský a politický vývoj je žiaľ dosť ťažko predstaviteľné, že ľudstvo v dnešnej podobe bude v nezmenenej forme a uvažovaní existovať v ďalšom cykle (doba ľadová – doba medziľadová), tak ako to bolo analyzované v tomto článku. Záujmy štátov, politikov, priemyslu, záujmových skupín, atď., sa nedokážu riadiť spoločným záujmom (napr. znižovanie obsahu CO_2, metánu a iných skleníkových plynov v atmosfére, ochrana tropických pralesov), hoci drvivá väčšina odborníkov varuje pred vážnymi konzekvenciami (zvyšovanie globálnej teploty vzduchu, ohrozenie pobrežných oblastí zvyšujúcou sa hladinou svetového oceánu, kde žijú a pracujú stovky miliónov ľudí, zánik nižších ostrovov a celých skupín biotopov, častejšie prejavy extrémnych klimatických javov, rozširujúce sa sucho v určitých oblastiach a s tým súvisiaci hladomor a masová migrácia v najviac postihnutých oblastiach, nedostatok vody na pitie a pre poľnohospodárstvo a pod.).

Poďakovanie

Poďakovanie patrí Ing. I. Pospíškovej (AFRY CZ, s.r.o., Praha, Česká republika) za cenné rady a pripomienky k problematike dlhodobej bezpečnosti úložiska. Svojimi odbornými radami nepochybne zlepšila úroveň tohto príspevku.

Zoznam literatúry

Boulton, G. S., 2001: Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. Technical Report 99-05. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Brandefelt, J. a Näslund, J-O. 2014: Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Juston, J. et al., 2007: Analysis of meteorological, hydrological and hydrogeological monitoring data. Forsmark – stage 2.1. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Kjelström, E., et al. 2009: Climate conditions in Sweden in a 100 000-year time perspective. Technical Report TR 09-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Marks, L., 2002: Last Glacial Maximum in Poland. – Quaternary Science Reviews, 21, s. 103-110.

Metelka, L. a Tolasz, R., 2009: Klimatické změny: fakta bez mýtů. Centrum pro otázky životního prostředí. Univerzita Karlova Praha.

Näslund, J.-O., 2006: Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. Technical Report TR-06-23. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Nývlt, D. a Dobrovolný, P., 2015: Klimatická stability území. Závěrečná zpráva. ČGS Brno a SÚRAO Praha.

Olvmo, M., 2010: Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Pimenoff, N. et al., 2011: Climate Scenarios for Olkiluoto on a Time-scale of 120,000 Years. Posiva Report 2011-04. POSIVA OY Olkiluoto.

Pollack, H. N. a Huang, S., 2000: Climate Reconstruction from Subsurface Temperatures. – Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 28, s. 339–365.

SKB, 2000. Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. SKB TR-00-20. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Thölix, L. et al., 2019: Climate Projections for Olkiluoto. Working report 2018-09. POSIVA OY, Olkiluoto.

Yokoyama, Y., et al., 2000: Timing of the last glacial maximum from observed sea level minima. Nature 406, s. 713-716

Zeman, E., 1992: The Blahutovice – 1 borehole near Hranice na Moravě: Weathering effects in Badenian deposits. *Scripta,* 22: s. 128-132

VYBRANÉ MOŽNOSTI ZAKLADANIA NA MÁLO ÚNOSNOM PODLOŽÍ

SELECTED POSSIBILITIES OF FOUNDATION ON POOR SUBSOIL

František Malík

Cofra-Chemia s.r.o., Zadunajská cesta 10, 851 01 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: malik@cofra.sk

Abstrakt: O zakladaní stavieb na neúnosnom podloží vyšlo v poslednej dobe viacero odborných publikácií. Vzhľadom na neustály vývoj nových technológií v posledných desaťročiach sa okruh zlepšovania únosnosti základovej pôdy značne rozšíril. Historicky najčastejšie používané metódy ako štrkové, či štrkopieskové piloty, drenážne rebrá, výmena podložia atď. boli a sú postupne nahradené metódami novými, resp. inovatívnymi. Vzhľadom k tomu, že v súčasnej dobe majú stavby veľmi často napätý časový harmonogram, využitie a cit pre správny typ technológie im otvára šancu splniť náročné podmienky doby výstavby. Hlavným pozitívom inovatívnych technológií je ich časová nenáročnosť v kombinácii s očakávaným výsledkom. Sám som sa vo svojej praxi stretol či už so staršími technológiami, ale čoraz viac sa stretávam s inovatívnymi technológiami.

Abstract: Several publications have recently been published about the foundation in poor subsoil. Due to the constant development of new technologies in recent decades, the scope for improving the bearing capacity of the foundation soil has expanded considerably. Historically, the most frequently used methods such as gravel or sandy-gravel piles, drainage ribs, subsoil replacement, etc. were gradually being replaced by new methods, or the innovative ones. Due to the fact that currently, very often, constructions have a tight schedule, use, and a feeling for the correct type of technology opens up a chance for them to meet the demanding conditions of the construction time. The main advantage of innovative technologies is their time-saving combination combined with the expected result. I have encountered in my practice, whether with older technologies, but I am increasingly encountering innovative technologies.

Kľúčové slová: podložie, základová pôda, dynamická konsolidácia, vertikálny drén, násyp

Key words: subsoil, foundation soil, dynamic consolidation, vertical drain, embankment

1. Úvod

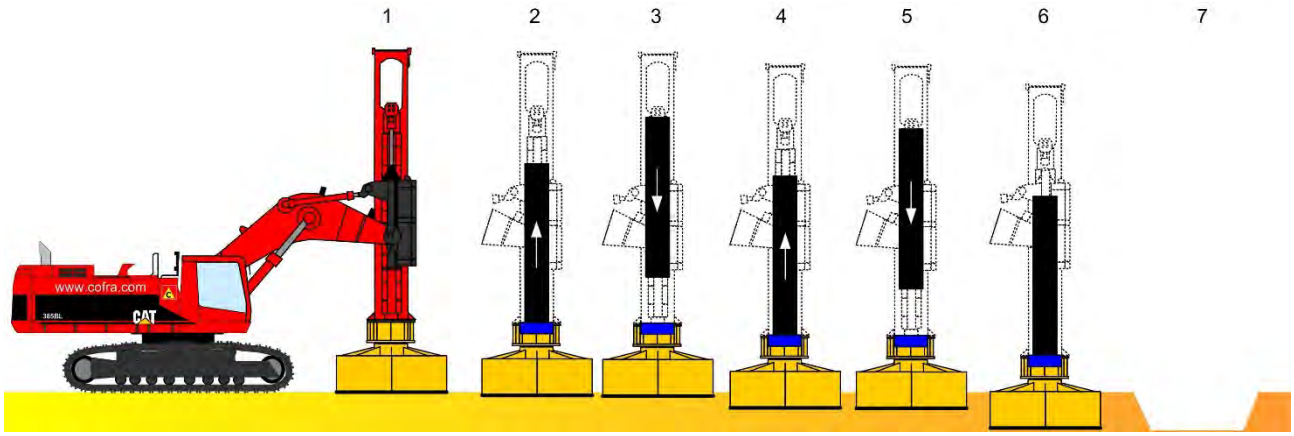
V posledných rokoch sa dostávajú stavby do časovo – náročných termínov realizácie a preto je potrebné využívať nové a progresívne metódy na urýchlenie ich zhotovenia. Vylepšenie podložia na niektorých zrealizovaných stavbách, nielen na Slovensku, si vyžadovalo použiť inovatívne metódy zlepšovania neúnosného podložia. V tradičných metódach (štrkové a pieskové piliere, výmena podložia) sa nachádzame v časovej a finančnej tiesni. Použitím metódy dynamickej konsolidácie CDC alebo metódy urýchlenia konsolidácie podložia pomocou vertikálnych drénov výrazným spôsobom eliminujeme nielen časovú náročnosť výstavby, ale zabezpečíme tým aj rovnomerné sadanie konštrukcií budovaných na násype.

2. Všeobecne – metóda hĺbkového hutnenia CDC

Účelom dynamickej konsolidácie (dynamického hutnenia) je dynamicky konsolidovať podložné vrstvy a zvyšovať stabilitu podložia zemného telesa. Dynamická konsolidácia zemín sa využíva v prostredí na to vhodnom, ako sú piesky, štrkopiesky, štrky, íly a spraše (prípadne antropogénny materiál). Tieto zeminy sú charakterizované rôznou konzistenciou, vysokou pórovou kapacitou a náchylnosťou na nerovnomerné sadanie. V prípade zaťaženia týchto typov zemín dochádza ku značnému sadaniu, ktoré je spôsobené ich vysokou stlačiteľnosťou. Vzniknuté sadania spôsobujú následné konštrukčné problémy.

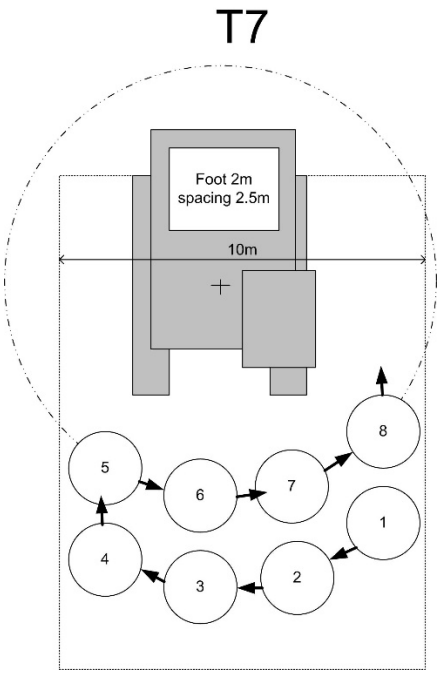
Realizácia dynamickej konsolidácie prebieha nasledovne:

- pláň musí byť vodorovne upravená (prípadne terasovito upravená),
- pásový nosič s hutniacou pätou (obr. 1) dynamicky konsoliduje zeminy podľa požiadavky budúcej stavby a posúva sa smerom dozadu *(*obr. 2*)*,
- po ukončení dynamickej konsolidácie sa realizujú kontrolné skúšky zhutnenia pomocou statických alebo dynamických penetračných sond a taktiež statické zaťažovacie skúšky.



Obr. 1 Skica strojného vybavenia CDC
Fig. 1 Sketch of the technical equipment of CDC

Použitie dynamickej konsolidácie je vhodné v nesúdržných zeminách, pri prechodových oblastiach (napríklad aj skládkach), pri zakladaní hál a objektov na neúnosnom podloží (napríklad medzistaničné priestory, atď.) Dynamickou konsolidáciou možno adekvátne nahradiť štrkové piliere alebo výmenu podložia. Výhodou je rýchlosť realizácie dynamického hutnenia, približne 2 000 m^2 denne.



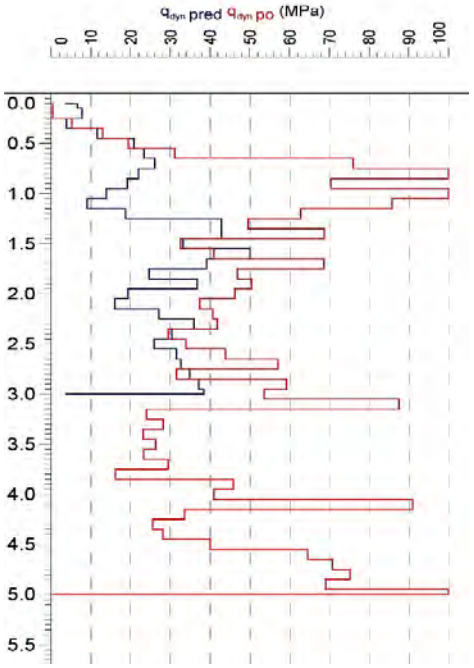
Obr. 2 Príklad postupu CDC
Fig. 2 Example of compacting

Použitie hutniacej päty závisí od požiadavky zhutnenia prostredia. Používame 3 typy ø 1,5 m; 2,0 m a 2,6 m (obr. 3). V závislosti od požadovaného stupňa a hĺbky zhutnenia sa zvolí potrebný priemer (čím je Ø nohy menší, tým sa dosiahne väčšia hĺbka). Použitie dynamického hutnenia je vhodné aj v intraviláne, kde minimálna vzdialenosť od zástavby je asi 15,0 m s tým, že je potrebné merať vibrácie v budove. Vzdialenosť sa dá skrátiť napríklad vytvorením ryhy pred alebo v okolí budovy. Technológia dynamického hutnenia umožňuje rýchlo a efektívne pripraviť podložie na ďalšiu výstavbu.

Obr. 3 Realizácia CDC
Fig. 3 (CDC execution)

Pre kontrolu účinku dynamického hutnenia sa vykonajú dynamické penetračné skúšky (DPS) pre preukázanie hĺbkového dosahu dynamickej konsolidácie. Súčasne sa pre overenie únosnosti základovej škáry realizujú statické zaťažovacie skúšky doskou. V súčasnej dobe neexistuje všeobecne prijatá metodika určenia alebo výpočtu dosahu dynamickej konsolidácie a preto sa pred zhutnením realizuje skúšobné pole (obr. 4), kde sa kontroluje hĺbkový dosah hutnenia pri tom-ktorom počte úderov na jedno miesto.

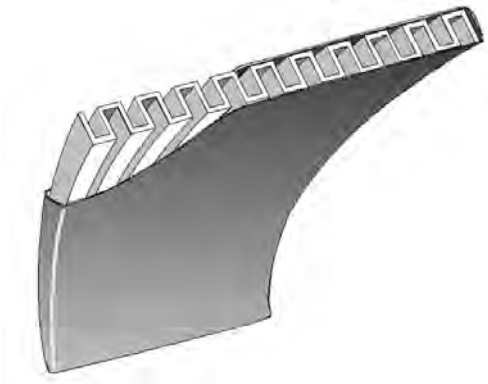
Obr. 4 Skúšobné pole dynamického hutnenia
Fig. 4 Field testing site for dynamic compaction



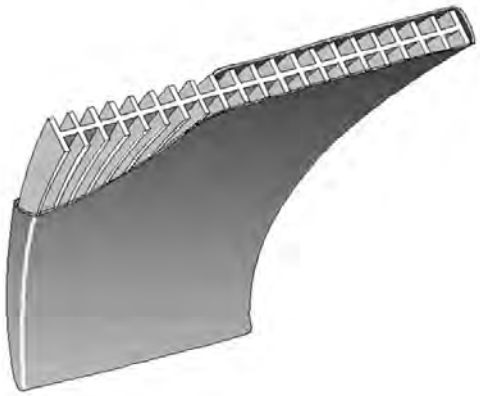
Obr. 5 Príklad z výstupu DPS
Fig. 5 Example of dynamic penetration test

3. Zakladanie násypov pomocou prefabrikovaných vertikálnych drénov Mebradrain ®

Na urýchlenie konsolidácie bol vyvinutý vertikálny prefabrikovaný geodrén MebraDrain®. Tento systém sa používa tam, kde sa pod zaťažením (od násypu alebo inej konštrukcie) očakáva veľké sadanie, pričom časový priebeh sadania je dlhší než je prípustné z hľadiska postupu výstavby. V takýchto prípadoch sa inštaláciou vertikálnych prefabrikovaných geodrénov v trojuholníkovom rastri docieli skrátenie únikovej dráhy vody a tým aj urýchlenie konsolidácie podložia. Zníženie pórových tlakov potom zapríčiní zmenu totálnych šmykových parametrov na efektívne, čím sa nepriamo zvýši stabilita podložia.
Vertikálny prefabrikovaný drén MebraDrain® sa skladá z tuhého PP jadra v tvare H alebo U, ktoré je obalené netkanou tepelne upravenou PP geotextíliou (obr. 6 a obr. 7). Netkaná geotextília vytvára filtračný obal, čím sa zamedzuje kolmatácii drenážnych kanálikov jemnozrnnou zeminou, zároveň je však zabezpečená filtrácia vody.



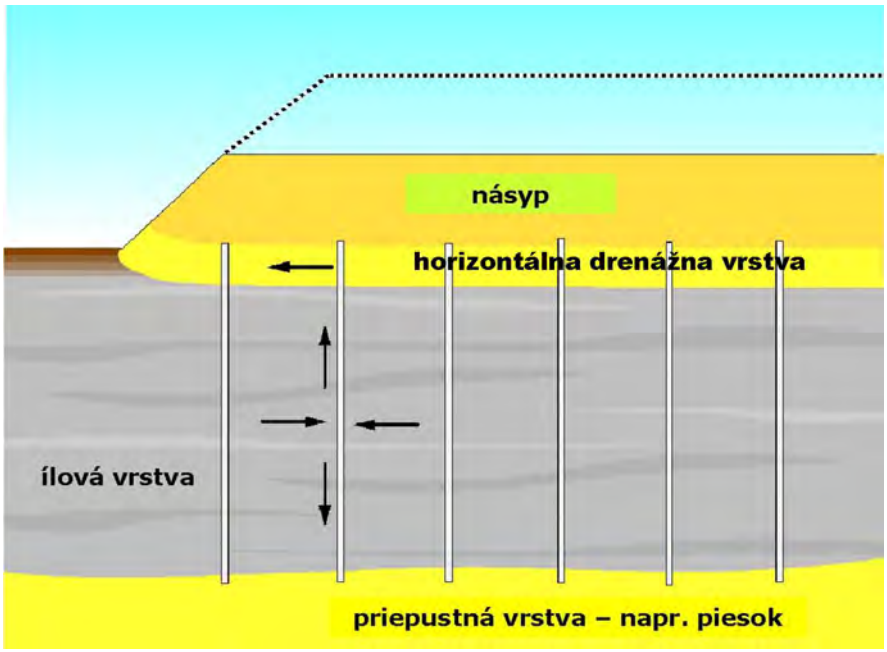
Obr. 6 Profil vertikálneho geodrénu MebraDrain v tvare U
Fig. 6 Profile of vertical drain MebraDrain® U-shaped



Obr. 7 Profil vertikálneho geodrénu MebraDrain® v tvare H
Fig. 7 Profile of vertical drain MebraDrain® H-shaped

Drenážne kanáliky tuhého jadra nie sú vzájomne prepojené, čím sa docieli laminárne prúdenie a tým aj lepšia drenážna funkcia (oproti turbulentnému prúdeniu, kde môže dôjsť k zacyklovaniu – vírivému pohybu vody, čo spomaľuje drenáž).
Dôležitým parametrom pre zachovanie funkčnosti vertikálnych drénov je deklarácia zachovania drenážnej kapacity (prietočnosti) v poprehýbanom stave nezávislou skúšobňou. Vertikálne geodrény sú inštalované vo vzpriamenom a natiahnutom stave. Počas pôsobenia povrchového zaťaženia sa podložie a tým aj geodrény vo zvislom smere stláčajú, pričom v prípade väčších sadaní dochádza k zníženiu až prerušeniu drenáže. Vertikálne prefabrikované drény MebraDrain® disponujú certifikátom vydaným nezávislou skúšobňou COMO (KIWA), ktorý je vydaný na základe početných skúšok (jednou z nich je skúška prietočnosti v poprehýbanom stave).

Prefabrikované vertikálne drény MebraDrain® sa aplikujú predovšetkým v oblastiach s vysokou hladinou podzemnej vody, kde sa v podloží nachádzajú jemnozrnné sedimenty (íly, hliny, prachovité alebo jemnozrnné piesky). Tieto sedimenty sú charakteristické nízkym koeficientom filtrácie a nízkym súčiniteľom konsolidácie. Najvhodnejším riešením pre urýchlenie drenáže je vertikálne geodrény votknúť do podložných relatívne priepustnejších sedimentov, čím sa zabezpečí obojsmerná drenáž (obr. 8).



Obr. 8 Schéma funkcie drénu
Fig. 8 Drain function diagram

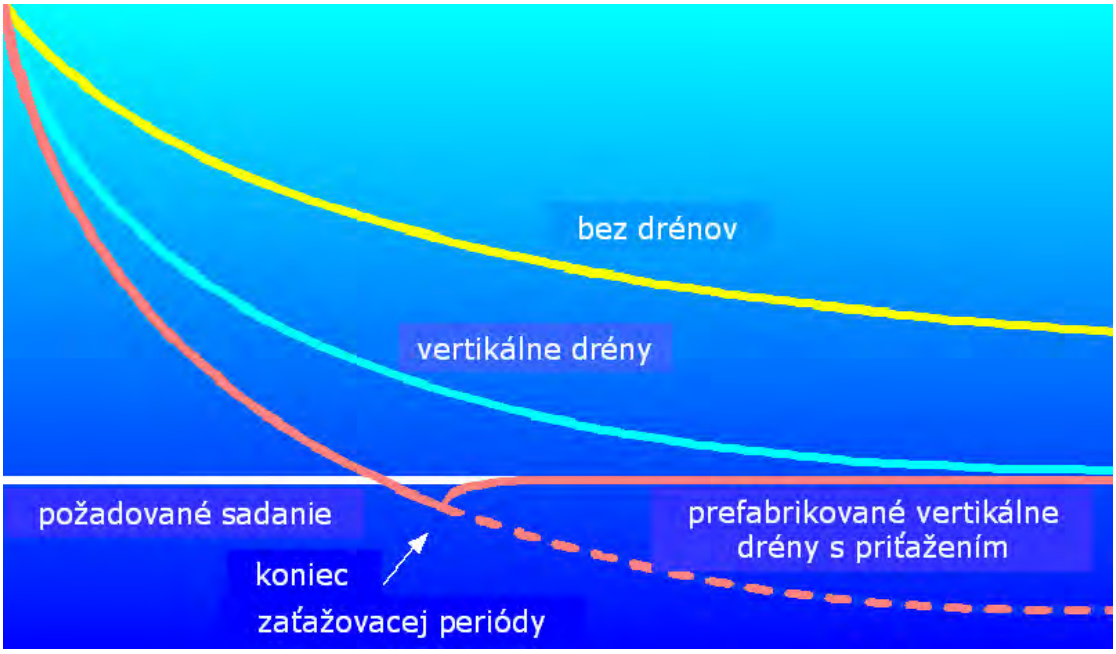
Inštalácia vertikálnych prefabrikovaných drénov MebraDrain® prebieha pomocou hydraulickej aplikačnej hlavice namontovanej na pásový podvozok (obr. 9). Inštalácia je kontrolovaná špeciálnym digitálnym zariadením, ktoré zaznamenáva po daných hĺbkových intervaloch hĺbku a inštalačný tlak. Každý geodrén je na povrchu po vytiahnutí aplikačnej pažnice odstrihnutý vo výške cca 30 cm nad terénom. Po zhotovení geodrénov je potrebné na aplikačnú pláň naniesť vrstvu plošného drénu – štrkodrvu vhodnej frakcie alebo plošný drenážny geokompozit. Plošná drenážna vrstva má za úlohu odviesť vodu spod telesa násypu do zberných rigolov pozdĺž násypu.

Obr. 9 Aplikácia geodrénov MebraDrain®
Fig. 9 MebraDrain® application

Pre výpočet rozmiestnenia drénov existuje niekoľko spôsobov. Najznámejšími sú Barronov vzťah a Kjelmanov vzťah, veľmi účinné je modelovanie pomocou metódou konečných prvkov (napr. v programe PLAXIS).

Vertikálne prefabrikované drény sú výhodnejšie oproti iným metódam urýchlenia konsolidácie (obr. 10) v nasledujúcich ukazovateľoch:

- šetrné k životnému prostrediu – bezvýkopová a bezvýplňová technológia, použité materiály sú ekologicky nezávadné
- ekonomická technológia – v porovnaní s inými technológiami aj pri hustejšom rastri predstavuje ekonomickejšie riešenie, pričom hustejší raster umožňuje urýchlenie výstavby stavebných objektov (urýchli sa konsolidácia)
- rýchlosť výstavby – pri optimálnych podmienkach až 8000 bm/deň
- digitálna kontrola hĺbky a tlaku pri inštalácii – kontrolovaný zaručený dosah požadovanej hĺbky.



Obr. 10 Vplyv geodrénov MebraDrain® na požadované sadanie násypu
Fig. 10 Effect of MebraDrain® for required embankment settlement

Záver

Vyššie spomenuté technológie si nachádzajú svoje uplatnenie tak na Slovensku a v Čechách, ako aj v Európe a vo svete. Napriek svojej progresivite sa na týchto systémoch stále pracuje a neustále podliehajú inováciám.

Metóda dynamickej konsolidácie CDC bola úspešne použitá na stavbách na Slovensku a v Českej Republike. Táto metóda úpravy neúnosného podložia je už bežne používaná vo svete v prostredí na to vhodnom. Celkovo sa pomocou tejto technológie už upravilo viac ako 300 tis. m^2 podložia v rámci projektov na Slovensku a Českej republike. Zákazky financované zo štátneho rozpočtu tvorili 70 % a súkromný sektor sa podieľal zvyšnými 30 %. Celkové dosiahnuté výsledky, resp. monitoring po realizácii dynamickej konsolidácie nevykazoval ani v jednom prípade akýkoľvek defekt ako napr. dodatočné sadnutie podložia. V prípade realizácie hutnenia v blízkosti budov sa pomocou jednoduchých opatrení znížilo šírenie dynamických vĺn na zanedbateľné minimum. Prostredie, ktoré sa dynamicky konsolidovalo,

často na pláni vykazovalo nemerateľné hodnoty únosnosti. Po realizácii hutnenia sa tieto geotechnické parametre niekoľko násobne zvýšili až do projektom predpísaných hodnôt.

CDC technológia je vhodná nielen pre dopravné stavby, ale aj pre pozemné stavby. V súčasnej dobe chystáme rôzne projekty zakladania veľkých obytných objektov a hál so zlepšením podložia použitím tejto technológie.

Zakladanie násypov pomocou prefabrikovaných vertikálnych drénov Mebradrain ® má na stavbách na Slovensku a v Českej Republike bohatú, viac ako 20 ročnú tradíciu, napriek tomu, že je niektorými odborníkmi stále nedocenená, neobjavená, alebo nechcená? Táto metóda urýchlenia konsolidácie neúnosného podložia je vo svete bežne používaná. Je to vysoko ekologická varianta zlepšenia podložia. Jedná sa o bezvýkopovú technológiu a oproti iným metódam, ako sú napr. štrkové piliere, dochádza k úspore materiálu zo životného prostredia (štrk), ktorého zásoby ako vieme nie sú nekonečné. Pri porovnaní celkového inštalovaného množstva vertikálnych drénov na Slovensku a Českej republike, čo je cca 3 mil. m, sa dá veľmi jednoducho spočítať úspora na životnom prostredí. Nejedná sa len o materiálovú úsporu, ale aj časovú a v konečnom dôsledku ekonomickú, na čo sa pozerá investor.

Súčasťou inštalácie vertikálnych drénov je dôsledný monitoring sadania podložia násypu. Vďaka čoraz presnejším výpočtovým metódam dokážeme realizovať také množstvo drénov a v takom rastri, aby sa dosiahnuté výsledky stretli s potrebami investora. Je totiž veľký rozdiel čakať na konsolidáciu podložia 3, 6, 9 alebo viac mesiacov. Monitoring po realizácii vertikálnych drénov nevykazoval ani v jednom prípade nepredvídateľné väčšie sadnutie podložia alebo iný nepriaznivý jav, čo by sa v konečnom dôsledku negatívne prejavilo na stavbe.

Záverom môžeme konštatovať, že vyššie uvedené technológie dynamickej konsolidácie CDC a vertikálnych drénov MebraDrain® boli vysoko efektívne, finančne a časovo nenáročné vzhľadom na ich ďalšie následné využitie.

SÚBOR NIELEN GEOTECHNICKÝCH MONITORINGOV, KTORÉ PRISPELI K ÚSPEŠNEJ MODERNIZÁCII ŽELEZNIČNEJ TRATE V OKOLÍ PÚCHOVA A POVAŽSKEJ BYSTRICE

THE SET OF NOT ONLY GEOTECHNICAL MONITORINGS WHICH HAVE CONTRIBUTED TO THE SUCCESSFUL MODERNIZATION OF THE RAILWAY LINE NEAR PÚCHOV AND POVAŽSKÁ BYSTRICA

Ladislav Stolárik[1], Erika Jarošová[2], Miloš Pleško[2]

[1]*CAD-ECO a.s., Svätoplukova 28, 821 08 Bratislava, stolarikl@cadeco.sk*
[2]*CAD-ECO a.s., Svätoplukova 28, 821 08 Bratislava, cadeco@cadeco.sk*
[2]*GEOFOS. s r. o., P. O. Hviezdoslava 3778/68, 010 01 Žilina, e-mail: milos.plesko@geofos.sk*

Abstrakt: Modernizovaný úsek železničnej trate Púchov – Považská Teplá je jedným zo súborov stavieb európskeho koridoru č. V, ktorého hlavným účelom je prepojenie železničného koridoru pre medzinárodnú dopravu vo východnej časti Európy. Vyvolaná investícia si vyžiadala okrem komplexnej rekonštrukcie existujúcich častí trate aj vybudovanie dvoch nových tunelov s názvami Diel (1 082 m) a Milochov (1 861 m), 14 ks nových železničných mostov, 6 ks nových cestných mostov, 4 ks podchodov pre cestujúcich a verejnosť, 11 ks priepustov a väčší počet zárubných a oporných múrov. Samotná objektová a technická náročnosť realizovaného stavebného diela so špecifickým trasovaním cez územia vodných zdrojov a aktívnych žriedelných línií kúpeľov Nimnica mala za následok rozsiahly balík nielen geotechnického, seizmického, ale aj balneologického monitoringu a monitoringu kvality a kvantity podzemných vôd. Predkladaný článok sumarizuje jednotlivé typy pozorovaní, nároky na technickú vybavenosť a v neposlednom rade ich správnu interpretáciu tak, aby mohlo byť stavebné dielo kvalitne a bezpečne vybudované.

Abstract: The modernized section of the Púchov – Považská Teplá railway line is one of the construction´s set of the European corridor No. V, whose main purpose is to connect the rail corridor for international transport in the eastern part of Europe. In addition to the reconstruction of the existing parts of the line, the induced investment also required the construction of two new tunnels named Diel (1,082 m) and Milochov (1,861 m), 14 new railway bridges, 6 new road bridges, 4 underpasses for passengers and the public, 11 culverts and a larger number of revetment and retaining walls. The object and technical complexity of the construction work itself, with specific tracing through the areas of water sources and active spring lines of the Nimnica Spa, resulted in an extensive package of not only geotechnical, seismic, but also balneological monitoring and monitoring of groundwater quality and quantity. The presented article summarizes the individual types of observations, the requirements for technical equipment and, last but not least, their correct interpretation, so that the construction work can be built, fulfilling the quality and safety requirements.

Kľúčové slová: monitoring, tunel, vrt, Diel, Milochov

Key words: monitoring, tunnel, well, Diel, Milochov

1. Úvod

Stavebné práce na modernizovanom úseku železničnej trate medzi železničnými stanicami Púchov a Považská Bystrica boli zahájené v druhej polovici roku 2016 a ukončené v prvej polovici roku 2022.

Modernizovaný úsek koridoru železničnej trate je situovaný do údolnej nivy rieky Váh, kde v úvode úseku mostným objektom trasa prekonáva Nosický kanál, ďalej pokračuje vysokým násypom pozdĺž celého Nosického ostrova a opäť mostným objektom križuje koryto Váhu, nachádzajúce sa na konci obce Nimnica. Prekážkou k plynulému pokračovaniu modernizácie železničnej trate sú úpätia vrcholu kóty Diel (528,00 m n. m.), ktoré sú prekonávané rovnomenným tunelom s celkovou dĺžkou 1 082 m. Z východného portálu tunela trasa železnice plynulo prechádza na estakádu, ktorá v najužšom mieste premosťuje Nosickú priehradu. Po prekonaní vodnej prekážky sa trať v istom úseku vracia do pôvodného koridoru, kde je z pravej strany v smere staničenia ochránená masívnym zárubným múrom, zabezpečujúcim severné svahy kóty Stavná. Pred obcou Horný Milochov sa železničná trať opäť vychyľuje zo svojho pôvodného smerového a výškového vedenia a úbočným tunelom s názvom Milochov prekonáva horský masív kóty Stavná. Za obcou Horný Milochov sa trať opäť vracia do svojej pôvodnej trasy a končí v železničnej stanici Považská Bystrica. Celá táto ucelená časť stavby si vyžiadala extrémne úsilie nielen v etape prípravy a projekcie, ale aj počas samotnej realizácie, nakoľko sa doposiaľ jedná o najkomplikovanejší úsek nielen z pohľadu objektovej sklady, ale aj z pohľadu trasovania jednotlivých objektov.

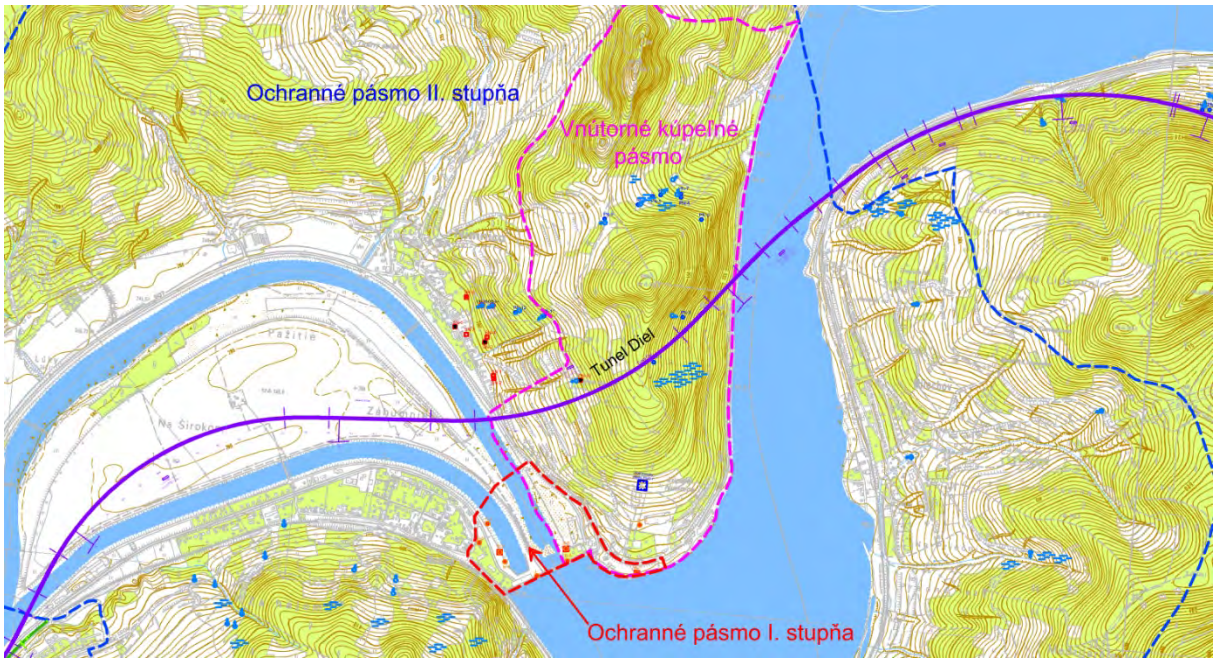
Úvodná časť železnice sa za stanicou Púchov smerovo dostáva do ochranného pásma II. stupňa prírodných liečivých zdrojov nimnických vôd, pričom samotný tunel Diel je situovaný vo vnútornom kúpeľovom pásme (obr. 1). Nová železničná trať pretína viacero ochranných pásiem vodných zdrojov a portálovými časťami zasahuje do zosuvných území. Okrem iného aj tieto dôvody mali za následok vybudovanie rozsiahleho monitorovacieho systému, ktorý bol využívaný počas výstavby jednotlivých stavebných objektov.

2. Monitoring kvality podzemných vôd na Nosickom ostrove

Nosický ostrov sa nachádza medzi odpadovým kanálom z hydrocentrály vodnej nádrže Nosice a korytom rieky Váh. Toto územie je včlenené do ochranného pásma II. stupňa prírodných liečivých zdrojov v Nimnici, ktoré bolo určené vyhláškou Ministerstva zdravotníctva SR z 13. júla 2011 č. 213/2011 Z. z.

Modernizovaná železničná trať je na ostrove vedená na násypovom telese, ktoré dosahuje od 8 m (pri sútoku kanála s Váhom) do 15 m (pri koryte Váhu), pričom jeho dĺžka je približne 1 820 m. Železničný násyp rozdeľuje Nosický ostrov v celej jeho dĺžke na dve časti, ktoré prepájajú štyri nové železničné viadukty a jeden podchod pre cestujúcu verejnosť, ktorý sa nachádza pod novovybudovanou železničnou zastávkou Nosice.

Zrážkové vody a odpadové vody z koľajových vozidiel sú z násypového telesa a z okolia železničných viaduktov zvedené rubovou drenážou do vsakovacích šácht s cieľom ich penetrácie do podložia. Technicky sú šachty vyplnené lomovým kamenivom a na dne sú uzavreté separačnou geotextíliou.



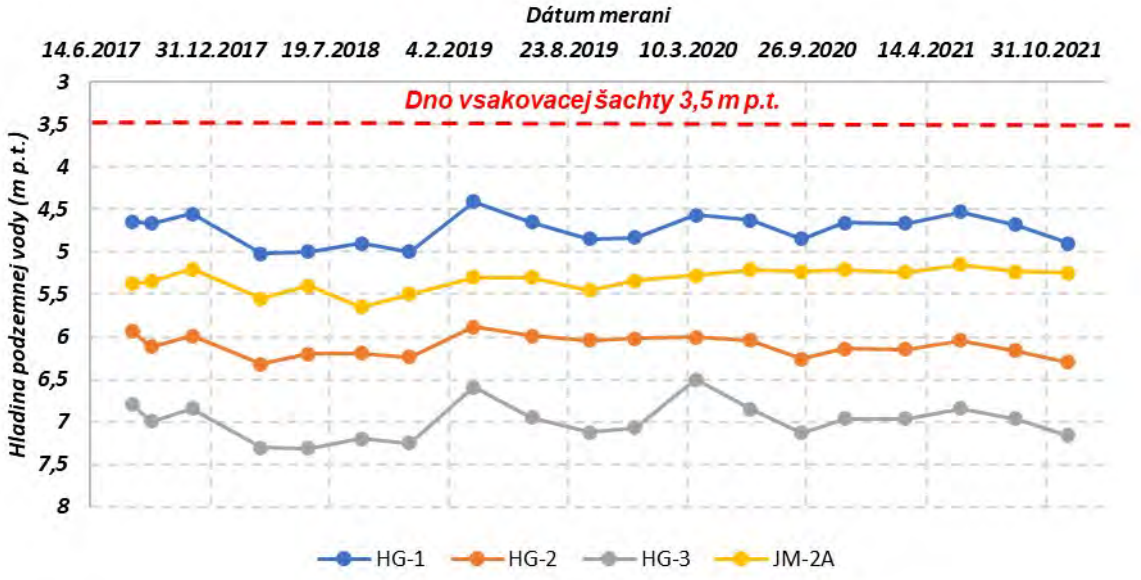
Obr. 1 . Ochranné pásma prírodných liečivých zdrojov voči modernizovanej trase železnice.
Fig. 1 Protection zones of natural curative sources against the modernized railway line.

Pre zabezpečenie kontroly kvality podzemných vôd a overenie účinnosti zachytávania znečisťujúcich látok vo vrstvách nenasýtenej zóny bol realizovaný monitoring kvality podzemných vôd. Za týmto účelom boli pozdĺž násypového telesa a v smere prúdenia podzemnej vody zrealizované 4 ks hydrogeologických vrtov s označením HG-1, HG-2, HG-3 a JM-2A (obr. 2). Z týchto vrtov sa v pravidelných intervaloch, jedenkrát za 3 mesiace, odoberali vzorky podzemnej vody (obr. 3), kde sa sledovali nasledovné parametre zo základnej sady:

pH, merná elektrická vodivosť, uhlíkový index $C_{10} – C_{40}$, PAU, BTX, NEL-IR

plus parametre z doplnkovej sady:

Cd, Cr celk., Cu, Pb, Ni, Zn, As, Ssulf



Obr. 2 . Vývoj hladiny podzemnej vody v monitorovacích vrtoch na Nosickom ostrove.
Fig. 2 Development of groundwater level in monitoring wells on Nosice island.

Počas celej doby výstavby, kedy bolo riziko znečistenia podzemných vôd najvýraznejšie z dôvodu vysokej intenzity stavebnej mechanizácie, neboli laboratórnymi analýzami preukázané prekročené limitné hodnoty sledovaných parametrov. Tento stav bol zachovaný aj po dokončení železničnej trate a jej spustení do plnej prevádzky.

Obr. 3 . Odber vzorky podzemnej vody z vrtu HG-2, v pozadí nový železničný viadukt č. 3 s vyznačenými vsakovacími šachtami pre vyústenie rubovej drenáže.
Fig. 3 Groundwater sampling from HG-2 well, in the background a new railway viaduct No. 3 with marked infiltration shafts for the outlet of the back drainage.

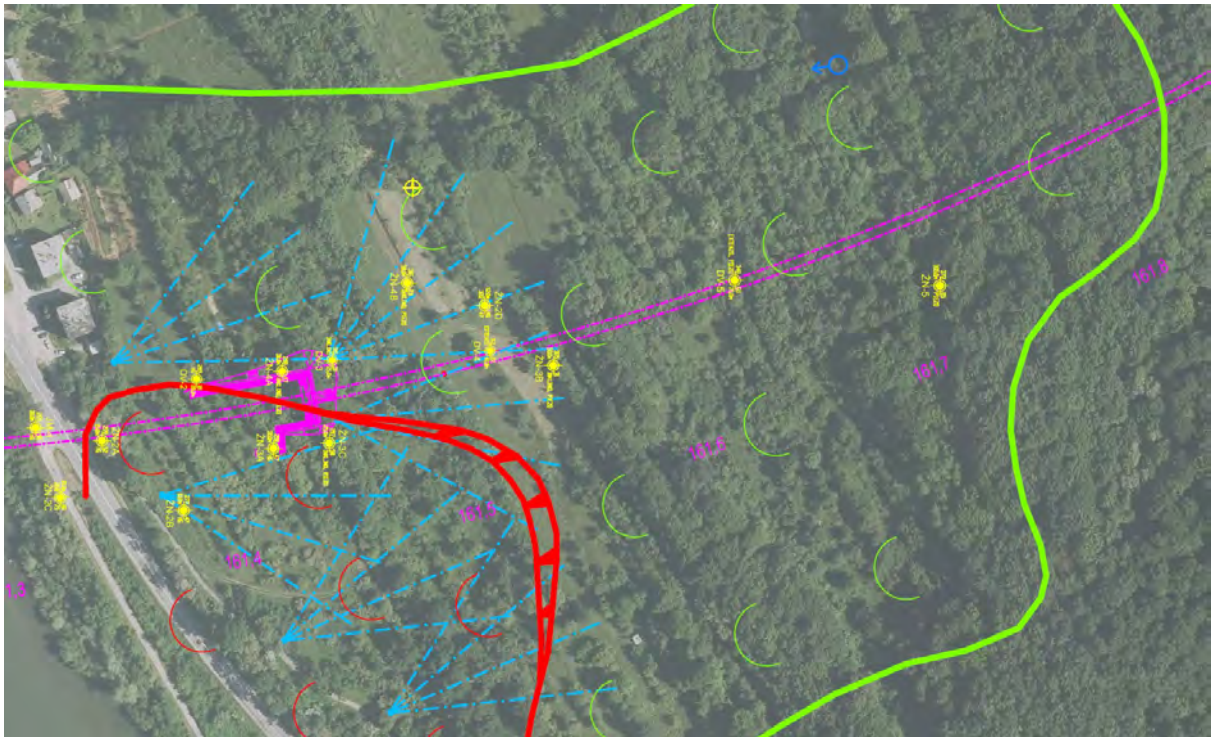
3. Zosuvné územie západného portálu tunela Diel

Kóta vrcholu Diel sa nachádza vo vnútornom kúpeľovom pásme kúpeľov Nimnica, pričom cez tento masív prechádza aj rovnomenný železničný tunel. Vstup a výstup do tunela je zabezpečený portálovými objektami, ktoré sú označené v zmysle ich orientácie na svetové strany – východný a západný portál.

V zmysle plánu organizácie výstavby boli ako prvé zahájené zemné práce na západnom portáli tunela Diel. Tento portál sa nachádza na konci obce Nimnica (smer Považská Bystrica) a do masívu úpätia vrcholu Diel je zahĺbený v oblasti rozsiahleho plošného zosuvu, rozprestierajúceho sa na severozápadnom svahu (obr. 4). Portálový svah je tvorený prevažne suťovými zeminami charakteru sute kamenito-ílovitej až ílovito-kamenitej hrúbky 10 až 12 m. Podložné horniny sú zastúpené mezozoickými ílovcami, siltovcami a pieskovcami rôzneho stupňa zvetrania a pevnosti, pričom s narastajúcou hĺbkou stupeň zvetrania klesá (W4 až po W2) a pevnosť narastá (R6 až po R3). Z toho dôvodu bol pre zabezpečenie stability portálového svahu a blízkeho okolia navrhnutý a realizovaný rad sanačných opatrení s cieľom trvalého zníženia hladiny podzemnej vody a následného vybudovania pilótovej kotvenej konštrukcie, vzdorujúcej zemným tlakom počas procesu výstavby, ale aj samotnej prevádzky železničného tunela.

Počas hĺbenia a stabilizácie jednotlivých etáží výkopu portálového objektu bola samotná konštrukcia, ale aj jej blízke geologické okolie, náchylné na svahové deformácie, sledované vybranými prvkami geotechnického monitoringu (Stolárik a kol., 2018). Stabilita

nadzárezových svahov bola monitorovaná pomocou presnej inklinometrie a zmena hladiny podzemných vôd hydrogeologickými vrtmi. Samotná portálová konštrukcia bola monitorovaná kombináciou geodetických polohových bodov a meraniami napätí na vybraných lanových kotvách.



Obr.4 Situácia západného portálu tunela Diel s vyznačenými zosuvmi (zelená, červená), monitorovacími vrtmi (žltá) a subhorizontálnymi odvodňovacími vrtmi (modrá)
Fig. 4 Situation of the western portal of the Diel tunnel with marked landslides (green, red), monitoring wells (yellow) and subhorizontal drainage wells (blue).

Zahĺbenie a následné zarazenie sa do horninového prostredia prinieslo so sebou aj zmenu napätosti v blízkom okolí portálovej konštrukcie, čo sa prejavilo na jednotlivých prvkoch geotechnického monitoringu. Konkrétne išlo o nerovnomerné sadanie čela portálovej konštrukcie (30 až 80 mm), čo malo za následok výrazný pokles napätí na monitorovaných lanových kotvách (pokles zo 750 kN na 230 kN). Blízky inklinometrický vrt s označením DV-3 taktiež vykazoval zvýšené pohyby smerom ku osi tunela, ktoré dosahovali do 50 mm.

Nadmerná deformácia čelnej portálovej steny a úvodných metrov primárneho ostenia, mala za následok doplnenie dodatočných stabilizačných prvkov a realizáciu dočasnej protiklenby v kalote razeného tunela v úvodných cca 90 m.

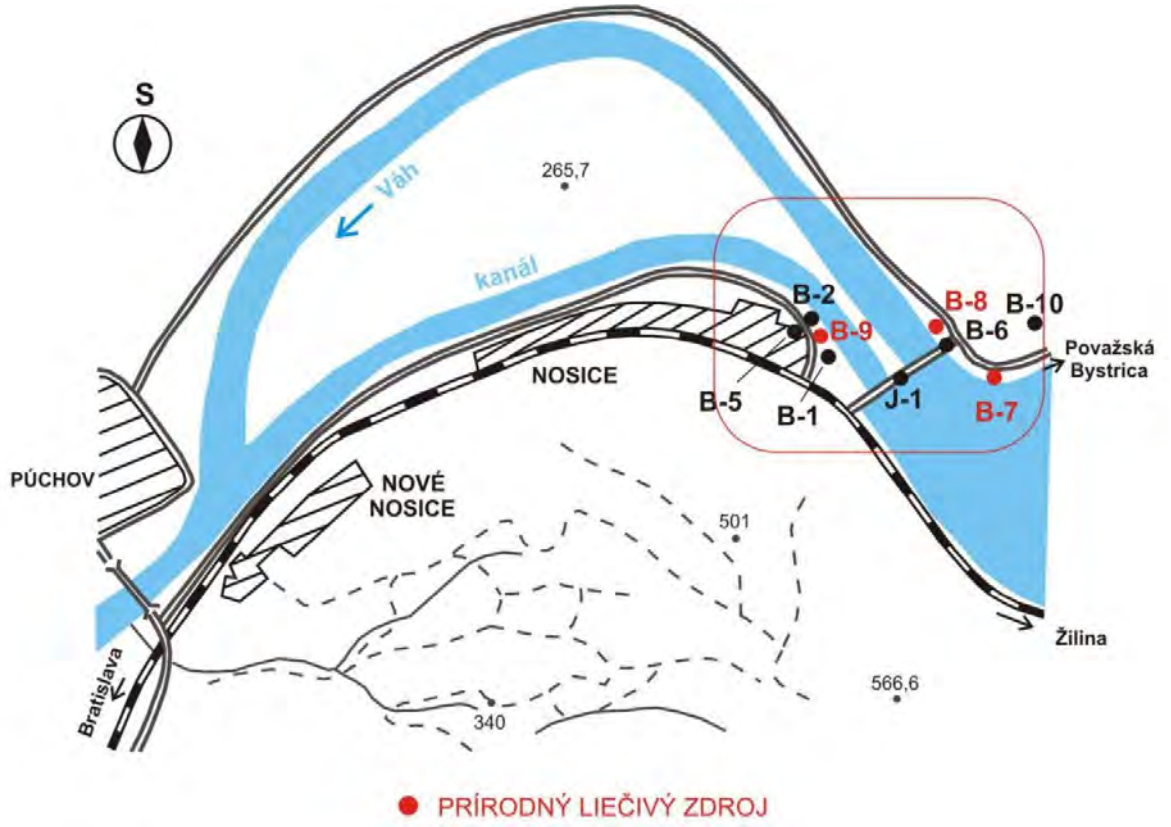
4. Vplyv razenia tunela Diel na prírodné liečivé vody kúpeľov Nimnica

Okrem rozsiahleho a precízneho geotechnického monitoringu, ktorý si bezpochyby razenie železničného tunela v bradlovom pásme vyžiadalo, bol realizovaný aj pomerne obsiahly hydrogeologický a balneologický monitoring podzemných a povrchových vôd v širšej oblasti tunela Diel a v areáli kúpeľov Nimnica.

V širšom území trasy tunela Diel boli v čase projektových príprav zrealizované viaceré hydrogeologické pozorovacie vrty, ktorými sa overoval prípadný dopad razenia tunela Diel na prírodné liečivé vody (obr. 5). Tieto vrty, ale aj lokálne studničky a pramene s vývermi minerálnych vôd, boli zahrnuté do monitorovacej siete a celkov ich bolo bezmála 30 ks. Pri týchto vrtoch a povrchových výveroch boli sledované základné parametre, ako sú hladiny

podzemnej vody, resp. prietok, plus režimové pozorovania – ako sú teplota, merná elektrická vodivosť a pH.

V spolupráci s kúpeľmi Nimnica bol sledovaný režim exploatačných vrtov, ktoré sa aktívne využívajú pre balneoterapiu a majú označenie B-7, B-8 a B-9. Pri týchto zdrojoch boli záujmovými parametrami výdatnosť ($l.s^{-1}$), hladina (m od O.B.), vodivosť ($\mu S.cm^{-1}$), obsah CO_2 ($mg.l^{-1}$), obsah HCO_3 ($mg.l^{-1}$) a teplota (°C).

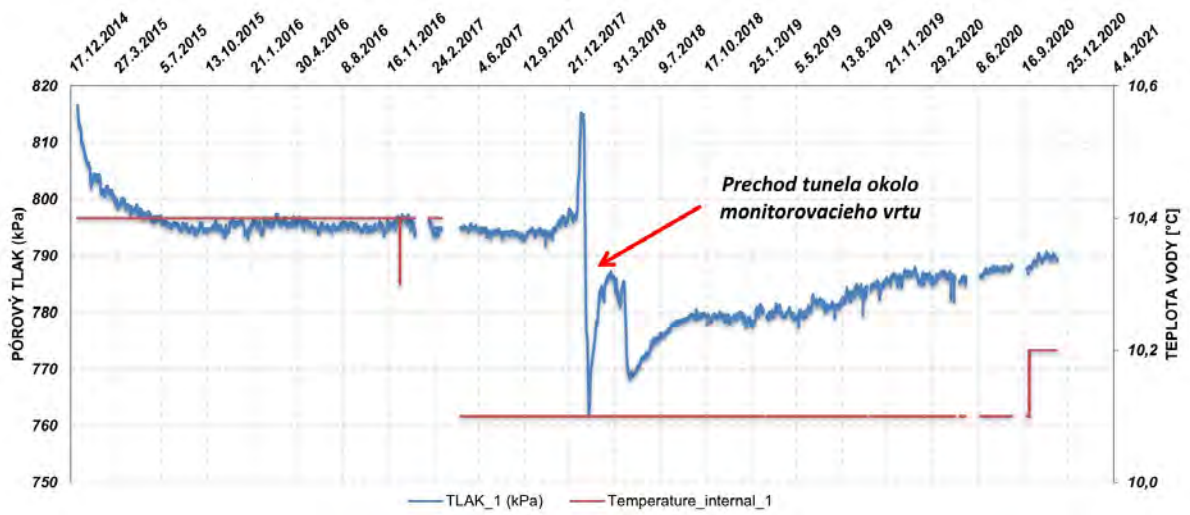


Obr5 Situácia vrtov s minerálnou vodou a prírodných liečivých zdrojov v lokalite Nimnica (B-7, B-8 a B-9).

Fig. 5 Situation of mineral water wells and natural curative sources in Nimnica (B-7, B-8 and B-9).

Trasovanie tunela Diel sa nachádza nad úrovňou liečivých zdrojov, resp. žriedelnej línie prírodných liečivých vôd, a preto nebol predpoklad, že k ich negatívnemu ovplyvneniu dôjde; koniec koncov to konštatoval aj záver podrobného hydrogeologického prieskumu z roku 2006 (Kuvik a kol.).

Počas razenia tunela Diel došlo v troch úsekoch k merateľnému prítoku podzemných vôd, z ktorých bolo možné odobrať vzorku pre následnú laboratórnu analýzu. Všetky tri vzorky preukázali zvýšenú mineralizáciu (nad 1 000 $mg.l^{-1}$), no nepriaznivý dopad na monitorovacích objektoch exploatačných vrtov pozorovaný nebol. Všeobecne možno hodnotiť, že žriedelná línia prírodných liečivých vôd ovplyvnená nebola, no v trase tunela isté zmeny v hladine a tlaku podzemnej vody pozorované boli. Bolo to hlavne pri vrtoch, ktoré boli vzdialené od osi tunela do 30 m. Pekným príkladom sú výsledky z vrtu ŽN-5 (obr. 6), ktorý je vystrojený piezometrom pre sledovanie tlaku vody v póroch. Snímač je umiestený vo vrte v hĺbke 88 m, čo je totožné s niveletou v danom staničení. Na pozorovaní tlaku podzemnej vody je možné pekne identifikovať približovanie sa kaloty k vrtu, jej prechod, plus následné stabilizovanie pórových tlakov po prerazení celého profilu tunela.



Obr.6 Vývoj tlaku podzemnej vody vo vrte ŽN-5 pred, počas a po prerazení tunela Diel v hĺbke 88 m p.t.

Fig. 6 Development of groundwater pressure in the ŽN-5 well before, during and after the penetration of the Diel tunnel at a depth of 88 m b.s.

5. Miestne vodné zdroje nad trasou tunela Milochov

Železničná trať sa pred obcou Horný Milochov úbočným železničným tunelom vnára do horninového masívu kóty Stavná, tunelom Milochov túto obec obchádza a na jej konci sa z neho vynára východným portálom. Ďalej trať pokračuje do železničnej stanice Považská Bystrica.

Obec, resp. časť obce Horný Milochov, je malou dedinkou v členitom horskom teréne, kde zásobovanie rodinných domov a rekreačných chát je zabezpečované prostredníctvom vlastných vodných zdrojov, formou kopaných studní a záchytov prameňov. Plánovaný a neskôr aj realizovaný železničný tunel preto vzbudzoval opodstatnenú obavu, či bude aj po vyrazení banského diela naďalej dostatok podzemnej vody pre individuálne zásobovanie.

Prvá hypotéza o strate podzemných vôd z miestnych vodných zdrojov bola publikovaná už v roku 2007 (Kuvik a kol.), kde sa v záveroch podrobného inžinierskogeologického prieskumu konštatovalo, že k istému ovplyvneniu prirodzených zásob podzemných vôd môže dôjsť. Toto tvrdenie vychádzalo nielen z poznania geologickej skladby v okolí tunelovej rúry, ale aj z návrhu projekčného riešenia hydroizolácie, kde bola navrhnutá a realizovaná tzv. dáždniková izolácia. Tento typ izolácie odvádza presakujúcu podzemnú vodu po hydroizolačnej fólii do pozdĺžnych drenáží a tieto ju následne odvádzajú do najbližšieho recipientu, čo je rieka Váh. Takéto riešenie odvodnenia tunela následne pôsobí ako trvalý drén v horninovom prostredí a má negatívny dopad na úroveň hladiny podzemnej vody. Tento prejav je hlavne v oblasti s nízkym nadložím a v úsekoch, kde tunelová rúra križuje tektonické zlomy, prípadne puklinové systémy saturované vodou.

Ako bolo vyššie spomenuté nad tunelom Milochov sa nachádzajú nehnuteľnosti s individuálnym zásobovaním vodou, a preto bolo potrebné zabezpečiť monitoring týchto zdrojov (Stolárik, 2021).

V prvej etape bol zrealizovaný pasport jednotlivých studní a vodných zdrojov a následne na základe týchto výsledkov bol navrhnutý ich monitoring. Hlavnou monitorovanou veličinou bolo sledovanie hladiny podzemnej vody, a to nielen vo vybraných studniach, ale aj v monitorovacích vrtoch, ktoré boli v čase projektovej prípravy zrealizované pozdĺž celej trasy tunela. Ďalší faktor, ktorý sa sledoval, bol úhrn zrážok a na najbližších vodných tokoch sa sledoval prietok povrchových vôd. Všetky monitorovacie objekty boli

vybavené snímačmi pre kontinuálny zber dát s online prenosom do centrály geotechnického monitoringu.

Razenie tunela Milochov bolo zahájené z východného portálu – z oblasti, ktorá sa nachádza v akumulačnej zóne čela rozsiahleho plošného zosuvu. Okrem rozsiahleho množstva prvkov geotechnického monitoringu, ktoré boli inštalované počas razenia tunela, bola zameraná pozornosť aj na podzemné vody vyskytujúce sa v kvartérnych útvaroch, ktoré tunel pretínal v úvodných cca 350 m.

Prvé prejavy so znížením hladiny podzemnej vody sa v portálovej oblasti prejavili v podstate okamžite, kedy počas hĺbenia hladina podzemnej vody zaklesla vždy na aktuálnu etáž výkopu, a tak sa postupne dostala z pôvodných 8 až 9 m p.t. na úroveň 16 až 18 m p.t.

Obr.7 Vývoj hladiny podzemnej vody v závislosti na postupe výstavby portálu a razení tunela.
Fig. 7 Development of groundwater level depending on the construction process of the portal and tunneling.

Bez zmeny nezostali ani vody v studniach, ktoré sa nachádzali v blízkosti tunela, kde výška nadložia dosahovala bezmála 20 m a nadložie bolo tvorené prevažne proluviálno-deluviálnymi sedimentmi charakteru ílov a ílov štrkovitých. Na základe pasportu miestnych vodných zdrojov boli studne v tejto lokalite vystrojené betónovými skružami a dosahovali hĺbku 3 až 5 m.

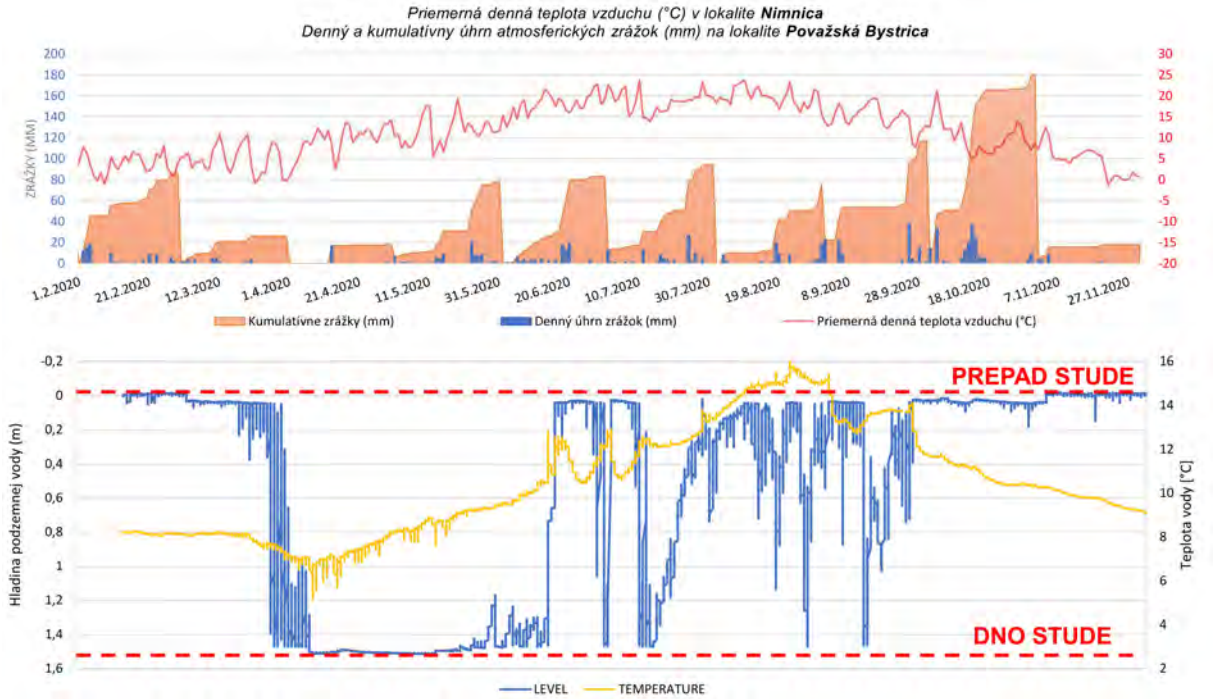
Obr.8 Kontinuálny monitoring podzemných a povrchových vôd v okolí tunela Milochov.
Fig. 8 Continuous monitoring of groundwater and surface waters around the Milochov tunnel.

Takýmto zdrojom bola aj studňa s označením SM-4, ktorá sa nachádzala 10 m od osi tunela a mala hĺbku približne 4,5 m. V tejto studni boli zachytávané hlavne zrážkové vody a vody plytkého kvartérneho obehu, ktoré ju napĺňali. Z obrázka č. 8 je pekne vidieť, ako pred prechodom tunela popod vodný zdroj trvalo zaklesnutie vody o 1 m približne 70 dní a po prechode tunela sa tento čas skrátil na približne 20 dní. V podstate k strate vody v zdroji nedošlo, no významný drenážny účinok tunela sa poprieť nedá. Takúto skutočnosť sme pozorovali v úseku tunela s pomerne nízkym nadložím do 20 až 30 m.

Obr.9 Vývoj stavu hladiny podzemnej vody v studni SM-4 v závislosti na zrážkach a na prechode tunela popod vodný zdroj.
Fig. 9 Development of the groundwater level in the SM-4 well depending on precipitation and the passage through the tunnel under the water source.

V trase tunela, kde výška nadložia dosahovala niekoľko desiatok metrov, sa takéto pozorovania už neopakovali a jediný súvis so zmenou objemu zásob podzemnej vody v zdrojoch bol priamoúmerný intenzite zrážok v danej lokalite. To malo za následok, že v mesiacoch, kedy zrážkové úhrny boli minimálne, dochádzalo k vysychaniu studní a nespokojní občania vinili práve zhotoviteľa tunela a tunel samotný, že im „sťahuje vodu“.

Takáto situácia nastala práve v čase, keď sa realizovali portálové objekty a nespokojný občan, ktorý mal svoju studňu vzdialenú niečo viac ako 1,5 km od najbližšieho pracoviska, sa sťažoval, že sa mu stratila voda zo studne. Po krátkej argumentácii a predložení priebežných výsledkov hydrogeologických pozorovaní sa spor urovnal a pochopil, že je ešte skoro žiadať o vybudovanie náhradného vodného zdroja.



Obr.10 Závislosť hladiny podzemnej vody vo vodnom zdroji s úhrnom zrážok v danej lokalite
Fig. 10 Dependence of the groundwater level in a water source with the total precipitation in a given locality

4. Záver

Tak náročná stavba, akou bola modernizácia železničnej trate v úseku medzi Púchovom a Považskou Bystricou, si zaslúžila významnú pozornosť nielen geotechnického ale aj hydrogeologického a balneologického monitoringu. Osobité špecifikácie lokality, ktorou je dnes železničná trať v plnej prevádzke vedená, si vyžiadali profesionálny prístup

zhotoviteľa geotechnického monitoringu a jeho flexibilitu prispôsobiť typ a druh meraní aktuálnym požiadavkám. Samozrejmosťou na predmetnej lokalite sa stal kontinuálny a plnoautomatický zber dát s online prenosom. Takto štruktúrovaný a nastavený monitoring následne šetril čas v procese rozhodovania a umožnil okamžité prijímanie opatrení s cieľom minimalizovať prípadné škody.

Zoznam literatúry

Kuvik, M., Sýkora, M., Ondrášik, R., Bohyník, J., Vandrová, G., Mucha, I., Rodák, D., Flimmel, J., Prohászka, A., Cabala, R., 2006: ŽSR, Modernizácia železničnej trate na rýchlosť do 160 km/h, úsek Púchov – Považská Bystrica, tunel Diel, podrobný hydrogeologický a orientačný inžinierskogeologický prieskum. Geofos s.r.o. Žilina, 2006. GEOFOND 86593.

Kuvik, M., Borovský, M.,Šamaj, M.,- Bohyník, J., Smoleňák, J., Matejček, A., Cabala, R., 2007: ŽSR – Modernizácia železničnej trate Púchov – Žilina na rýchlosť do 160 km/h, úsek Púchov – Považská Teplá, orientačný inžinierskogeologický prieskum. GEOFOS s.r.o. Žilina, 2007

Stolárik, L., Kuvik, M., Krupec, M., Kačur, T., 2018: Výsledky a skúsenosti z geotechnického a hydrogeologického monitoringu tunela Diel

Stolárik, L., 2021: Železničný tunel Milochov a jeho vplyv na okolité prírodné prostredie.

Výsledky geotechnického monitoringu publikované na online serveri https://inset.sahure.cz.

„KONCOVÁ“ PEVNOSŤ A ĎALŠIE PROBLÉMY MECHANIKY ZEMÍN V PRAXI

MISUNDERSTANDING OF ULTIMATE STRENGTH AND FURTHER FALLACIES IN OUR PRACTICE

Jakub Roháč[1,2], Jan Boháč[1], Jan Najser[1]

[1]Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 00 Praha, Česká republika,
[2]Česká geologická služba, Klárov 3, 118 00 Praha, Česká republika,
e-mail: jakub.rohac@natur.cuni.cz

Abstrakt: Dobre zadané laboratórne skúšky mechaniky zemín a ich správne vyhodnotenie sú predpokladom úspešného inžinierskogeologického, resp. geotechnického prieskumu či posudku. Ich zadávanie by malo rešpektovať teoretické základy odboru, nie vždy sa tak ale deje. Často sa v praxi stretávame s používaním napr. nesprávneho typu pevnosti zemín v zosuvných územiach alebo s nesprávnym vyhodnotením pevnosti v kritickom stave ako pevnosti „koncovej“, vyhodnotenej z posledných dát šmykového napätia zaznamenaných v okamžiku ukončenia krabicovej šmykovej skúšky. Problémom je aj vyhodnocovanie nekonsolidovaných neodvodnených triaxiálnych skúšok s nenulovým uhlom vnútorného trenia, alebo nebezpečné nadhodnotenie pevnosti zemín v dôsledku príliš vysokej rýchlosti šmyku pri laboratórnej skúške, či v dôsledku chybnej extrapolácie priamkovej obálky mimo interval aplikovaných napätí. Tieto chyby sa objavujú pomerne hojne, hoci nemajú žiadne teoretické ani praktické opodstatnenie. V príspevku sú stručne zrekapitulované princípy mechaniky zemín, rozobrané uvedené chyby a problémy a navrhnuté správne postupy stanovenia pevnosti zemín pre inžinierskogeologickú prax.

Abstract: Well assigned laboratory tests and their appropriate evaluation are a necessity for a successful site investigation or report in the field of engineering geology and geotechnics. Planning and evaluation of tests should respect the established soil mechanics theory, which unfortunately is not always the case. Wrong types of soil strength are often used, such as the peak strength in landslide areas. Recently, the critical strength has often been determined from the last readings of the conventional shear box tests on undisturbed specimens, which is generally inadequate and wrong. Another problem is the misinterpretation and misuse of unconsolidated undrained triaxial tests. Last but not least, strength is often overestimated due to excessively high shear rate and/or due to a wrong extrapolation of straight-line strength envelopes out of the applied stress interval. In the paper the theory of soil strength is summarized, above-mentioned mistakes are analyzed and established methods of soil strength determination for geotechnical practice are recapitulated.

Kľúčové slová: pevnosť zemín, mechanika zemín, koncová pevnosť
Key words: soil strength, soil mechanics, ultimate strength

1. Úvod

V poslednej dobe pozorujeme v našej geotechnickej praxi nesprávnu interpretáciu šmykových laboratórnych skúšok. Impulzom k napísaniu tohto príspevku bolo, okrem iných chybných vyhodnotení, hlavne vyhodnocovanie tzv. „koncovej pevnosti“ zemín. Koncová pevnosť je definovaná v českej technickej norme ČSN 73 6133 z roku 2010 na str. 12

v odstavci *3.1.13.4 kritická (koncová) smyková pevnosť*. V praxi ale došlo k nepochopeniu a dezinterpretácii tohto slovného spojenia, a to hlavne na úrovni spracovania a interpretácie laboratórnych skúšok pre geotechnické prieskumy. Koncová pevnosť je vyhodnocovaná ako pevnosť v okamžiku ukončenia šmykovej (krabicovej) skúšky, čo je nesprávne. Kritická pevnosť má pritom jednoznačnú fyzikálnu definíciu, má zásadné postavenie v teórii pevnosti, v teórii medznej plochy stavu (Schofield a Wroth, 1968), či v pokročilých konštitučných modeloch (Mašín, 2018). Ďalšími chybami, vyskytujúcimi sa v geotechnických prieskumoch a posudkoch, sú napr. výber nesprávneho typu pevnosti v súvislosti s hodnotením stability svahu, nepochopenie koncepcie neodvodnenej pevnosti alebo nevhodne zvolená rýchlosť šmyku pri laboratórnej skúške.

V príspevku stručne zhrnieme koncepciu pevnosti zemín a navrhneme racionálny postup voľby vhodnej pevnosti pre dané geotechnické úlohy. Ukážeme tiež názorné príklady nesprávnych interpretácií, ktoré pomôžu k lepšiemu pochopeniu diskutovanej problematiky.

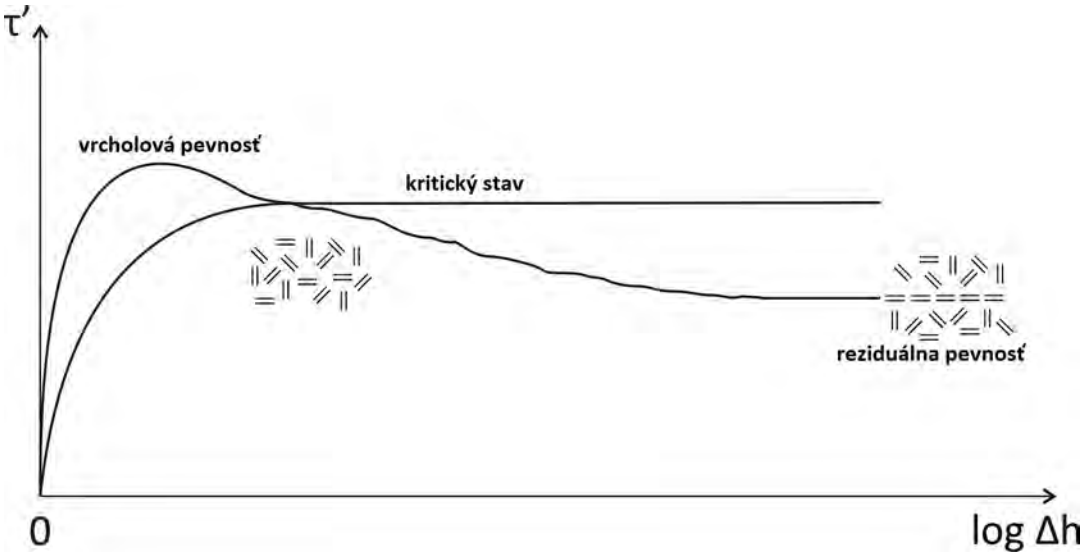
2. Pevnosť zemín

Pevnosť zemín je študovaná už desaťročia (napr. *in* Skempton, 1964; Schofield a Wroth, 1968; Wood, 1990; Atkinson, 1993; Mitchell a Soga, 2005). Je definovaná ako maximálne šmykové napätie, ktoré je zemina za daných podmienok schopná preniesť. Všeobecne môže zemina pri šmykovom namáhaní dosiahnuť tri základná typy porušenia: vrcholovej pevnosti, pevnosti v kritickom stave a v prípade jemnozrnných zemín pevnosti reziduálnej. Vzťah medzi šmykovým napätím τ a šmykovým pretvorením log Δh popisuje obr. 1. V prípade uľahnutého piesku alebo prekonsolidovaného ílu rastie τ s narastajúcim Δh do limitnej hodnoty – vrcholovej pevnosti. Tá je spôsobená zaklinením zŕn (Taylor, 1948; Schofield, 2005), je závislá na pórovitosti a na pôsobiacom efektívnom napätí. Vrcholová pevnosť sa vyjadruje uhlom vnútorného trenia a súdržnosťou. Vrcholová súdržnosť je v prípade uľahnutej zeminy iba zdanlivá, spôsobená lineárnym vyjadrením v skutočnosti nelineárnej obálky vrcholovej pevnosti a jej extrapoláciou mimo skúšobný obor napätí. Skutočná súdržnosť je spôsobená cementáciou zŕn (obr. 2, viď napr. Trhlíková a kol., 2009). V ďalšom texte ale uvažujeme o zeminách bez cementácie medzi zrnami.

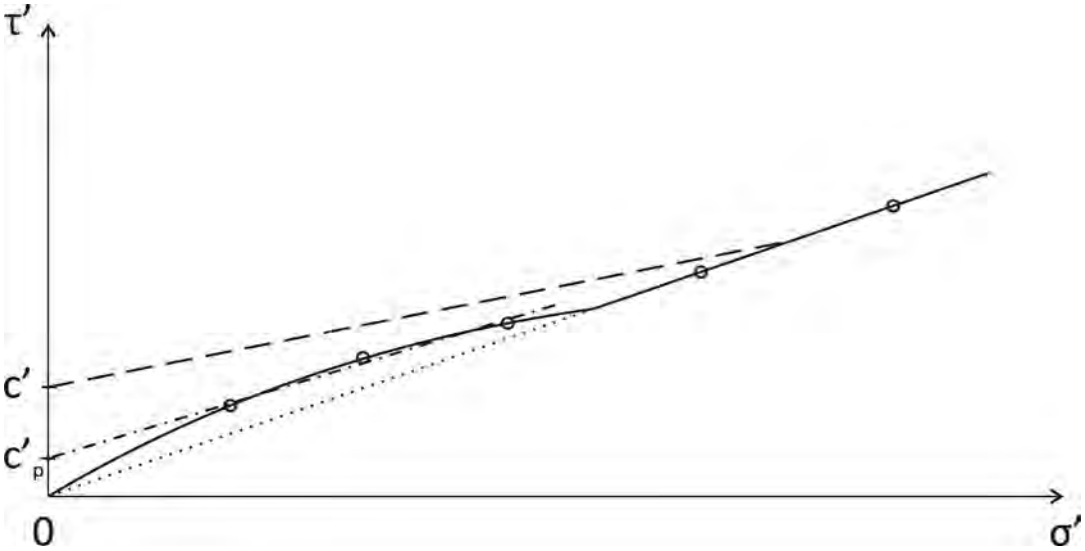
Po prekročení vrcholovej pevnosti klesá šmykové napätie s narastajúcim pretvorením v prípade homogénneho pretvárania do hodnoty kritickej. Homogénne pretváranie môžeme popísať ako turbulentné tečenie zŕn, prebieha v širšej zóne a je charakteristické tzv. kritickou pórovitosťou. Tá je konštantná pre daný materiál a efektívne napätie. Kyprá zemina svoju pórovitosť počas šmyku zmenší, uľahnutá naopak zväčší.

V prípade jemnozrnných zemín s dostatočným obsahom ílovej frakcie šmykové napätie s narastajúcou deformáciou ďalej klesá do hodnoty reziduálnej. Tento pokles je sprevádzaný vývojom šmykovej plochy a usporiadaním zŕn v smere tejto plochy. Reziduálna pevnosť je najnižšia odvodnená pevnosť ílovitých zemín a je dosiahnutá až po dostatočne dlhom šmykovom pretvorení (obr. 1).

Pevnosť v kritickom stave a reziduálna pevnosť sú pre danú zeminu materiálovými parametrami (konštantami). Má na nich vplyv len zrnitosť, tvar zŕn a ich drsnosť (Atkinson, 1993; Cho a kol., 2006). Sú charakteristické uhlom vnútorného trenia a nulovou súdržnosťou.



Obr. 1 Vrcholová pevnosť, pevnosť v kritickom stave a reziduálna pevnosť. Naznačenie orientácie zŕn zeminy.
Fig. 1 Peak, critical state and residual shear strengths of soils. Indication of the orientation of soil grains.



Obr. 2 Obálky pevnosti: čiarkovane – obálka so skutočnou kohéziou spôsobenou cementáciou; bodkovane – pevnosť v kritickom stave, plnou čiarou – obálka vrcholovej pevnosti (Zbraslavský piesok, s použitím piatich normálových napätí, Feda, 1977); bodkočiarkovane – lineárna aproximácia vrcholovej pevnosti pre prvé tri najnižšie normálové napätia
Fig. 2 Illustration of the failure envelopes: dashed line – failure envelope with true cohesion caused by cementation; dotted line – critical state strength; solid line – peak failure envelope (Zbraslav sand, under five normal stresses; Feda, 1977); dash-dotted line – the example of linear approximation of peak strength for the first three normal stresses

Vyššie popísané zhrnutie pevnosti zemín je založené na princípe efektívnych napätí (Terzaghi, 1936). Pri stanovovaní vrcholových a kritických parametrov je nutné, či už pri odvodnených, alebo neodvodnených laboratórnych testoch, poznať efektívne napätie. Pod neodvodnenými podmienkami je možné analyzovať stabilitný problém aj v totálnych

napätiach pomocou neodvodnenej pevnosti. Jej podstatou je, že nasýtená vzorka bez možnosti odvodnenia zachováva konštantný objem a preto má aj konštantnú hodnotu šmykového odporu, nezávislú na použitom normálovom napätí. Hodnota šmykového odporu zodpovedá jedinému bodu na obálke pevnosti ($\tau_{max} = s_u$). Preto je obálka neodvodnenej pevnosti vodorovná, s nulovým uhlom vnútorného trenia.

3. Stanovenie pevnosti zemín

3.1 Laboratórne skúšky

Najvhodnejšou cestou, ako správne stanoviť pevnosť zemín, je prostredníctvom dobre zvolených laboratórnych testov. V prípade vrcholovej pevnosti je potrebné testovať neporušenú vzorku s pôvodnou štruktúrou bez zmeny v usporiadaní zŕn. Kvôli nelinearite vrcholovej obálky pevnosti je zásadná vhodná voľba použitých normálových napätí. Tie musia odpovedať zaťaženiu zeminy v teréne, výsledok skúšky platí len pre tento obor použitých napätí a nemal by sa extrapolovať mimo tento interval. Naopak pevnosť v kritickom stave nie je závislá na pôvodnej štruktúre a ideálnou skúšobnou vzorkou je rekonštituovaná pasta (Burland, 1990). Použitie neporušenej vzorky je dokonca kontraproduktívne z dôvodu jeho heterogenity a tým pádom možnosti lokalizovať deformáciu pri šmyku a vznik šmykových plôch, čo znemožňuje dosiahnutie kritického stavu. Rovnaké platí aj pre stanovenie reziduálnej pevnosti, t. j. na rekonštituovanej vzorke. Obálka pevnosti v kritickom stave a obálka reziduálnej pevnosti sú na rozdiel od tej vrcholovej lineárne a prechádzajú počiatkom, t. j. ich súdržnosť je nulová. Preto je možné extrapolovať výsledok aj mimo skúšobný obor napätí.

Pre vrcholovú pevnosť a pevnosť v kritickom stave je najvhodnejším prístrojom pre ich stanovenie triaxiálny prístroj. Alternatívou je použitie translačnej krabicovej skúšky. V prípade kritického uhla vnútorného trenia je ale jeho stanovenie krabicovou skúškou len jeho odhadom, vzhľadom k vytvoreniu diskrétnej šmykovej plochy (viď *in* napr. Morgenstern a Tchalenko, 1967). Pri správnom uskutočnení a vyhodnotení skúšky je ale použitie šmykovej krabice pre jednoduché geotechnické úlohy akceptovateľnou alternatívou. V prípade hrubozrnných zemín je takmer nemožné pripraviť dostatočne kyprú vzorku, aby dospela do kritického stavu s homogénnou napätosťou a pretváraním. Pre hrubozrnné zeminy bez jemnozrnnej frakcie je preto vhodnejšou metódou stanovenie pevnosti v kritickom stave meraním uhla prirodzenej sklonitosti (Miura a kol., 1997). Ideálnym postupom stanovenia reziduálnej pevnosti je použitie rotačného krabicového prístroja, ktorý umožňuje neobmedzene dlhý posun na šmykovej ploche až do dosiahnutia dobre definovanej reziduálnej pevnosti. V geotechnickej praxi sa ale často určuje niekoľkonásobným opakovaným posunom v translačnej šmykovej krabici. Výsledok z translačnej šmykovej krabicovej skúšky ale nezodpovedá výsledku reziduálnej pevnosti. Vithana a kol. (2011) uvádza, že tento výsledok môže byť 1,02 násobne vyšší než pri použití rotačného prístroja v prípade slieňovcov, ale až 1,9 násobne vyšší v prípade tufitických ílov. Takto nadhodnotená pevnosť z translačnej šmykovej skúšky môže byť dôsledkom opakovanej zmeny smeru šmýkania, vplyvom ktorej nemusí dôjsť k dokonalému usporiadaniu zŕn na šmykovej ploche. Ďalším faktorom môže byť priebežný únik zeminy do priestoru medzi obe polovice šmykovej krabice a následné zvyšovanie hodnoty meraného šmykového odporu. V dôsledku straty zeminy často nie je reálne uskutočniť dostatočný počet posunov krabice, t. j. nedosiahne sa dostatočné pretvorenie pre dosiahnutie reziduálnej hodnoty šmykového napätia.

3.2 Odhad pevnosti s použitím korelačných rovníc

Pevnosť v kritickom stave a reziduálna pevnosť sú materiálové parametre a preto ich môžeme korelovať s inými materiálovými parametrami, napr. s indexom plasticity (Kenney, 1959; Kanji, 1974; Ladd a kol., 1977; Seyček, 1978; Lupini a kol., 1981; Wood, 1990; Terzaghi a kol., 1996; Stark a Eid 1997; Roháč a kol., 2020), s podielom ílovej frakcie (Skempton, 1964; Skempton, 1985; Mesri a Cepeda-Diaz, 1986; Tiwari a Marui, 2005) alebo s mineralógiou (Kenney, 1967; Di Maio a kol., 2015). Roháč a kol. (2020) ukázali, že najlepším prediktorom pre odhad pevností je index plasticity, ktorý v sebe zahŕňa vlhkosť na medzi plasticity a aj vlhkosť na medzi tekutosti. Korelácia s obsahom ílovej frakcie ponúka výsledok s väčším rozsahom v rozmedzí niekoľkých stupňov (Skempton, 1964). Využitie mineralógie pre korelačné odhady je zase ovplyvnené rôznymi faktormi, napr. chemizmom pórovej vody (Di Maio a Fenelli, 1994). Za vhodné korelačné rovnice pre odhad efektívneho uhla vnútorného trenia ϕ' s použitím indexu plasticity I_p môžeme považovať nasledujúce vzťahy z literatúry:

$\phi'_{cr} = 0{,}81\text{-}0{,}223 \log I_p$ Kenney, (1959), (1)

$\sin \phi'_{cr} = 0{,}35\text{-}0{,}1 \ln (I_p / 100)$ Wood, (1990), (2)

$\phi'_r = 46{,}6\ I_p^{-0{,}446}$ Kanji, (1974), (3)

$\phi'_{cr} = 60\ I_p^{-0{,}25}$ Roháč a kol., (2020),(4)

$\phi'_r = 53\ I_p^{-0{,}40}$ Roháč a kol., (2020), (5)

kde ϕ'_{cr}/ϕ'_r je v radiánoch v prípade (1) a (2) a v stupňoch v prípade (3), (4) a (5), I_p je v %. Tieto korelačné rovnice sú vybrané z dôvodu ich odvodenia z veľkého počtu dát, pre jednoduchosť ich vyjadrenia a na základe ich citovanosti v odbornej literatúre.

Je potrebné ale stále myslieť na to, že výsledkom korelačných rovníc je len orientačná hodnotu uhla vnútorného trenia a s takýmito odhadmi je potrebné pracovať veľmi opatrne. Najvhodnejším postupom stanovenia pevnosti zemín je prostredníctvom správne zvolených laboratórnych testov.

4. Problémy mechaniky zemín v praxi

4.1 Voľba nevhodného typu pevnosti

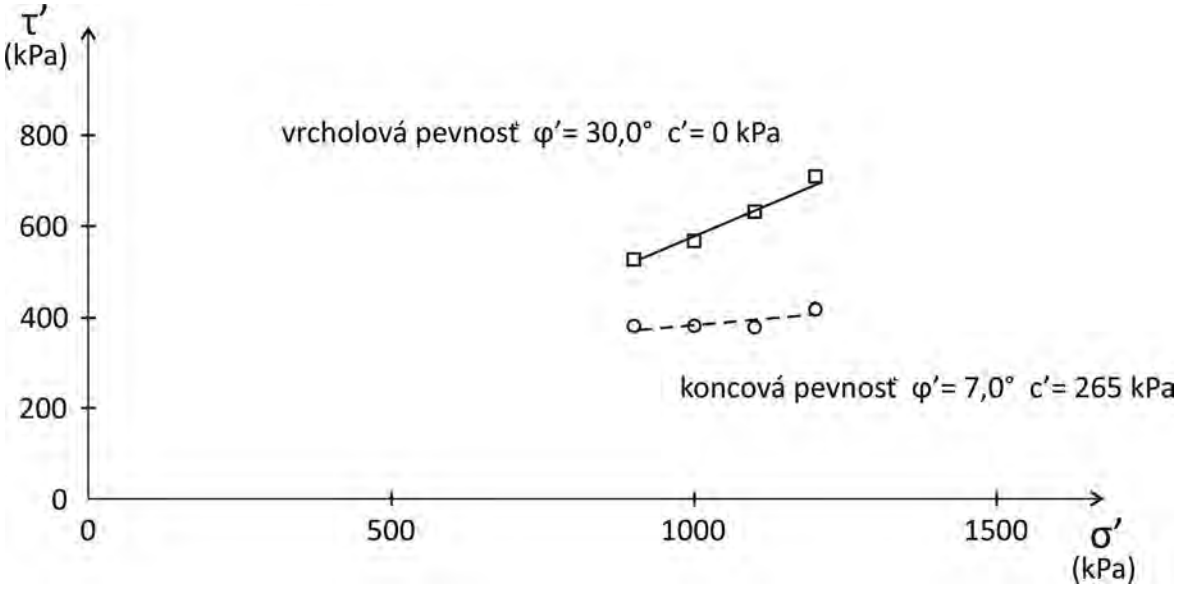
V posudkoch a prieskumoch pre zosuvné udalosti je často na vzorkách zemín stanovovaná vrcholová pevnosť. Pritom nevhodnosť používania vrcholovej pevnosti pri takýchto typoch geotechnických problémov je v odbornej literatúre dobre vysvetlená (napr. Mesri a Shahein, 2003). V zeminách, ktoré v minulosti prekonali podstatnú deformáciu (napr. plazenie), sa už nemôže aktivovať vrcholová pevnosť. Chovanie svahu potom ovláda pevnosť nižšia a preto je použitie výsledku skúšky vrcholovej pevnosti na nebezpečnej strane od správneho výsledku. Tieto myšlienky boli diskutované už v dielach Tiedemanna (1937) a Haefeliho (1938, 1950), ale do šesťdesiatych rokov 20. storočia neboli dostatočne zdôraznené. Problematiku pevnosti zemín pri zosúvaní dobre objasnil v Rankinovej prednáške Skempton (1964). Poukázal na to, že mobilizovaná pevnosť už porušených svahov (napr. svahy zosuvných území) alebo silne rozpukaných ílov je výrazne nižšia, než vrcholová. Pevnosť vyššiu, než je tá v kritickom stave, môžeme očakávať len v prípade kompaktných nízkoplastických (index plasticity <20 %, Chandler, 1984) svahov, alebo s podielom ílovej frakcie nižším než 20 % (Skempton, 1985). Štúdie veľkého počtu prvoaktivovaných zosuvných udalostí (napr. Mesri a Abdel-Ghaffar, 1993; Potts a kol., 1997 alebo Stark a Eid,

1997) viedli k záverom, že mobilizovaný uhol vnútorného trenia je v rozmedzí medzi kritickou a reziduálnou hodnotou. V prípade ílovitých zemín bude konečná stabilita svahu (po kolapse) ovládaná reziduálnou pevnosťou (Skempton, 1970), preto je v prípade reaktivovaných zosuvov doporučené v analýzach používať reziduálny uhol vnútorného trenia (Skempton, 1964; Palladino a Peck, 1972; Brooker a Peck, 1993). Zhodu uhla vnútorného trenia získaného spätnou analýzou s laboratórne nameranými reziduálnymi uhlami potvrdzujú napr. Blondeau a Josseaume (1976), Chandler (1984), Skempton (1985) a tiež Stemberk a kol. (2016) v prípade zosuvu Dobkovičky na diaľnici D8 v Českej republike.

4.2 Koncová pevnosť

Termín „koncová pevnosť“ definuje česká technická norma ČSN 73 6133 ako pevnosť v kritickom stave. Toto slovné spojenie bolo pravdepodobne prevzaté z anglickej literatúry, kde sa často pevnosť v kritickom stave pomenúva termínom „ultimate strength“ (napr. Atkinson, 1993), čím je myslená pevnosť „konečná“. Je to hodnota šmykového odporu po poklese z prípadného vrcholového stavu. To ale platí pre zeminy, ktoré nemajú dostatočný obsah ílovitej frakcie. V tomto prípade je pojem „ultimate strength“ správny. Nešťastný preklad termínu „ultimate“ ako „koncový“, namiesto „konečný“, však spôsobil v geotechnickej praxi stotožňovanie kritickej pevnosti s pevnosťou stanovenou na konci šmykovej skúšky. Takto stanovená pevnosť nemá žiaden fyzikálny ani praktický význam a nemá nič spoločné s teóriou kritických stavov. Jedná sa len o náhodnú hodnotu pevnosti medzi vrcholovým a reziduálnym stavom. Odpovedá to len hodnote tangenciálneho napätia v dobe, keď sa laborant rozhodol ukončiť šmykovú skúšku.

Ako príklad uvádzame jedno z mnohých vyhodnotení „koncovej“ pevnosti v rámci výsledkov laboratórnych skúšok z prieskumu nedávnej zosuvnej udalosti z diaľnice D8 v Českej republike. Na obrázku 3 sú zobrazené obálky vrcholovej a „koncovej“ pevnosti, získané z krabicovej šmykovej skúšky na neporušenej vzorke.



Obr. 3 Príklad vyhodnotenia vrcholovej a „koncovej“ obálky pevnosti z geotechnickej praxi
Fig. 3 An example of determination of peak and „critical“ failure envelope in geotechnical practice (solid and dashed line, respectively)

Vzorka je podľa krivky zrnitosti a indexových vlastností označená ako hlina vysoko plastická (F7 MH podľa ČSN 73 6133), s indexom plasticity 21,8 %, podielom ílovej frakcie 23 %, prachovej frakcie 47 % a stupňom konzistencie 1,59. Bola odobraná z hĺbky 44 m pod terénom, s hladinou podzemnej vody v hĺbke 26,6 m. Použité normálové napätia počas

laboratórnej skúšky odpovedali rozsahu 900 – 1 200 kPa. Vrcholová pevnosť dosiahla hodnotu vrcholového uhla vnútorného trenia 30°s vrcholovou kohéziou 0 kPa. Skúška bola po 14 mm deformácii ukončená a z hodnôt tangenciálneho napätia pri ukončení skúšky bola stanovená „koncová pevnosť“, ktorú autori prieskumu stotožnili s pevnosťou v kritickom stave, s hodnotami uhla vnútorného trenia 7° a kohéziou 265 kPa. Takto vyhodnotená pevnosť v žiadnom prípade neodpovedá pevnosti v kritickom stave. Pre predstavu – tabuľka č. 1 ukazuje odhad kritickej pevnosti tejto vzorky. Na základe 3 korelačných rovníc z odbornej literatúry je odhad kritického uhla na základe indexu plasticity v rozmedzí 27,8° – 30,2°. Vzhľadom na zvolené normálové napätia počas laboratórnej skúšky, ktoré odhadujeme ako dvojnásobne vyššie, než odhadované zvislé efektívne napätie v mieste odberu vzorky, je stanovená vrcholová pevnosť blízka tej kritickej s nulovou súdržnosťou. Stanovená „koncová pevnosť“ je ale nepoužiteľnou hodnotou. Jej stanovenie bolo zbytočné a je dôkazom chybného vyhodnotenia a nepochopenia základov laboratórnych skúšok mechaniky zemín.

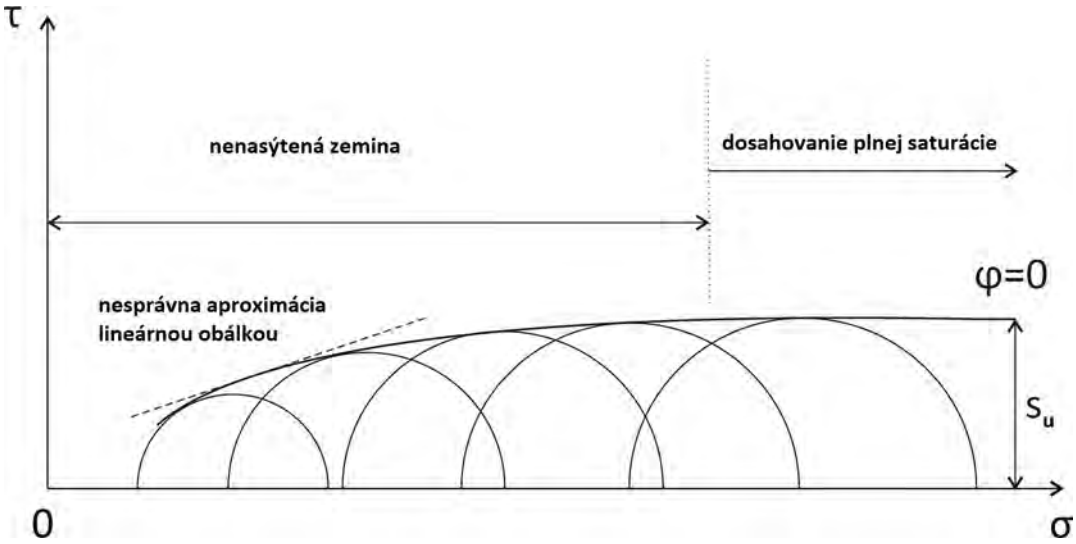
Tab. 1 Pevnosť zmeraná v rámci posudku a pevnosť odhadnutá použitím korelačných rovníc (1), (2) a (4)

Tab. 1 Shear strength determined by laboratory tests compared with the values estimated by correlations (1), (2) and (4).

Hĺbka odberu	Index plasticity	Lab. test ϕ'_v	Lab. test ϕ'_k	Odhad ϕ'_{cr} (1)	Odhad ϕ'_{cr} (2)	Odhad ϕ'_{cr} (4)
44 m	21,8 %	30° (c = 0 kPa)	7° (c = 265 kPa)	29,3°	30,2°	27,8°

4.3 Nenulový uhol totálnej pevnosti

Koncept neodvodnenej pevnosti a teda totálne parametre majú svoje úzke využitie iba v nasýtených zeminách, keď sa predpokladá ich zaťaženie takou rýchlosťou, že pórové tlaky nestíhajú disipovať a pórová voda tak preberá zmenu napätia. Obálka pevnosti má v tomto prípade smer vodorovný s osou normálových napätí a uhol vnútorného trenia ϕ_u je nulový. Výslednou hodnotou neodvodnenej nekonsolidovanej UU triaxiálnej skúšky je teda parameter totálnej pevnosti s_u (v inej literatúre môže byť tiež označenie c_u). To sa ale v praxi niekedy nerešpektuje. V prípade nenasýtených zemín je síce možné v laboratóriu zmerať uklonenú priamkovú obálku pevnosti (viď obr. 4.), koncept neodvodnenej pevnosti ale v tomto prípade platný nie je, pretože v póroch takto testovanej vzorky je stlačený vzduch.



Obr. 4 Príklad obálky pevnosti UU triaxiálnej skúšky a jej nesprávna interpretácia

Fig. 4 Stresses at failure for UU triaxial tests on unsaturated soil and their misinterpretation by a straight line envelope

Hoci sa vzorka rýchlym zaťažením dosýti, skúška ale už nie je neodvodnená, keďže vzorka zmenila svoj objem a tým aj svoj počiatočný stav. Priamková obálka v prípade nenasýtenej zeminy naznačená na obrázku a jej nenulový uhol vnútorného trenia potom nemajú žiaden fyzikálny význam. Nenulový parameter ϕ_u nereprezentuje pevnosť zeminy ani za drénovaných, ani za nedrénovaných podmienok a nedá sa používať v riešeniach praktických analýzach stability (Parry, 1995).

4.4 Vysoká rýchlosť šmyku a chybná extrapolácia obálky pevnosti

Drvivá väčšina šmykových laboratórnych skúšok za účelom stanovenia pevnosti sa v našej praxi robí pomocou translačných šmykových krabíc. Tento prístroj, na rozdiel od triaxiálneho prístroja s meračom pórových tlakov, nie je schopný kontrolovať odvodnené podmienky počas šmyku. V prípade veľmi vysokej rýchlosti šmyku dochádza v súvislosti s objemovými zmenami vo vzorke k vzniku pórových tlakov a k skresleniu výslednej nameranej hodnoty pevnosti z dôvodu čiastočne neodvodneného šmyku. Pri tomto type laboratórnej skúšky neexistuje žiadna kontrola toho, či k neodvodnenému šmyku došlo. Preto musí byť zvolená rýchlosť šmyku vždy na bezpečnej strane. Platné technické normy popisujú spôsob výpočtu vhodnej rýchlosti šmyku na základe konsolidácie vzorky, podľa našich skúseností ale volia laboratóriá aj napriek tomu často rýchlosť vyššiu.

Okrem nevhodnej rýchlosti šmyku ovplyvňuje negatívne výslednú hodnotu pevnosti aj nesprávna extrapolácia mimo interval skúšobných napätí v prípade zisťovania vrcholovej pevnosti na neporušenej vzorke. Ako je už spomenuté, obálka vrcholovej pevnosti nie je lineárna (obr. 2). Ak obor použitých napätí zasahuje napr. do oblasti prekonsolidácie, môže sa to prejaviť poklesom uhla vnútorného trenia a fiktívnym nárastom súdržnosti. Hlavne v obore nízkych napätí tak dochádza k nebezpečnému nadhodnoteniu vrcholovej pevnosti zeminy a k nerealistickému preceneniu mobilizovanej pevnosti, čo vedie k chybným analýzam a následnému kolapsu (Atkinson a Farrar, 1985 alebo Boháč a Feda, 1997).

5. Záver

Pevnosť zemín a s ňou spojená problematika, ktorá je popísaná v príspevku, je v odbornej literatúre dobre vysvetlená už desaťročia. Autori inžinierskogeologických prieskumov a posudkov to ale niekedy nerešpektujú. Často sa v ich prácach používajú nerelevantné typy pevností, ako je napr. vrcholová pevnosť v zosuvných územiach. Stanovovanie „koncovej“ pevnosti z dát nameraných pri ukončení laboratórnej skúšky a stotožnenie tejto pevnosti s pevnosťou kritickou je nesprávne. Tak isto vyhodnotenie neodvodnenej pevnosti s nenulovým uhlom trenia nemá žiaden fyzikálny význam a ani praktické použitie, a to ako v prípade nasýtených, tak aj v prípade nenasýtených zemín. Posledným diskutovaným problémom v rámci tohto príspevku bolo nebezpečné nadhodnotenie pevnosti, resp. (vrcholovej) súdržnosti, spôsobené príliš vysokou rýchlosťou šmyku pri krabicovej translačnej skúške, či nadhodnotenie vrcholovej pevnosti v dôsledku použitia nesprávneho oboru aplikovaných normálových napätí počas laboratórnej skúšky. Použitie takto chybných postupov v prípade prieskumov a posudkov nie je v správach z pravidla nijak vysvetlené. Ak autori s doterajšími poznatkami mechaniky zemín nejak nesúhlasia, určite môžu svoj dôvod výberu pevnosti pre zosuvné udalosti či stanovenie kritickej pevnosti z dát na konci laboratórnej skúšky adekvátne v textoch svojich prác odôvodniť a obhájiť. Zlepšila by sa tak ich výpovedná hodnota a celkovo by to prispelo k skvalitneniu prác v našom odbore.

Zoznam literatúry

Atkinson, J. H., 1993: An introduction to the mechanics of soils and foundations: through critical state soil mechanics. McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.

Atkinson, J. H., Farrar, D. M. 1985: Stress path tests to measure soil strength parameters for shallow landslips. 11ICSMFE, Vol. 2, s. 983-986.

Blondeau, F., Josseaume, H., 1976: Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle en laboratoire. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 65, s. 90-106.

Boháč, J., Feda, J., 1997: Poruchy svahů jámové skládky. 25. konf. Zakládání staveb, Brno, s. 106-109.

Brooker, E. W., Peck, R. B., 1993: Rational design treatment of slides in overconsolidated clays and clay shales. Canadian Geotechnical Journal, 30(3), s. 526-544.

Burland, J. B., 1990: On the compressibility and shear strength of natural clays. Géotechnique 40: s. 329–378. doi: 10.1680/geot.1990.40.3.329.

ČSN 73 6133 (1998) Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Český normalizační úřad.

Di Maio, C., Fenelli, G. B., 1994: Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid. Géotechnique 44: s. 217–226. doi: 10.1680/geot.1994.44.2.217.

Di Maio, C., Scaringi, G., Vassallo, R., 2015: Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: influence of pore fluid composition. Landslides 12: s. 657–667. doi: 10.1007/s10346-014-0511-z.

Feda, J., 1977: Základy mechaniky partikulárních látek. Academia.

Haefeli, R., 1938: Mechanische Eigenschaften von Lockergesteinen. Schweiz. Bauzeitung, 111, s. 24-26.

Haefeli, R., 1950: Investigation and measurements of the shear strengths of saturated cohesive soils. Geotechnique, 23, s. 186–208.

Chandler, R. J., 1984: Recent European experience of landslides in over-consolidated clays and soft rocks (State-of-the-Art Lecture). In *Proc. 4th Int. Symp. Landslides Toronto* (Vol. 1, s. 61-81).

Cho, G.- Ch., Dodds, J., Santamarina, J. C., 2006: Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness,and Strength: Natural and Crushed Sands. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(5): s. 591-602.

Kanji, M. A., 1974: The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. Géotechnique 24: s. 671–674. doi: 10.1680/geot.1974.24.4.671.

Kenney, T. C., 1959: Discussion of "Geotechnical Properties of Glacial Lake Clays" by T. H. Wu, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85, No. SM3, Part 1, 1959, s. 67-79.

Kenney, T. C., 1967: The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. In: Proc. Geotechnical conference, Oslo, 1967, s. 123–129.

Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., Poulos, H. G., 1977: Stress-deformation and strength characteristics. Proc. 9th. Int. conf. soil mech. and found. Eng. s. 421-494.

Lupini J. F., Skinner A. E., Vaughan P. R., 1981: The drained residual strength of cohesive soils. Géotechnique 31: s. 181–213.

Mašín, D., 2018: Modelling of Soil Behaviour with Hypoplasticity: Another Approach to Soil Constitutive Modelling. Springer.

Mesri G., Cepeda-Diaz A. F., 1986: Residual shear strength of clays and shales. Géotechnique 36: s. 269–274. doi: 10.1680/geot.1986.36.2.269.

Mesri, G., Abdel-Ghaffar, M. E. M., 1993: Cohesion intercept in effective stress-stability analysis. Journal of Geotechnical Engineering, 119(8), s. 1229-1249.

Mesri, G., Shahien, M., 2003: Residual shear strength mobilized in first-time slope failures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(1), s. 12-31.

Mitchell, J. K., Soga, K., 2005: Fundamentals of soil behavior (Vol. 3). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Miura, K., Maeda, K., Toki, S., 1997: Method of measurement for the angle of repose of sands. Soils and foundations, 37(2): s. 89-96.

Morgenstern, N. R., Tchalenko, J. S., 1967: Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear, Géotechnique 17, s. 309-328.

Palladino, D. J., Peck, R. B., 1972: Slope failures in an overconsolidated clay, Seattle, Waashington. Geotechnique, 22(4), s. 563-595.

Parry, R. H. G., 1995: Mohr circles, stress paths and geotechnics. E&FN Spon.

Potts, D. M., Kovacevic, N., Vaughan, P. R., 1997: Delayed collapse of cut slopes in stiff clay. Geotechnique, 47(5), s. 953–982.

Roháč, J., Scaringi, G., Boháč, J., Kycl, P., Najser, J., 2020: Revisiting strength concepts and correlations with soil index properties: insights from the *Dobkovičky* landslide in Czech Republic. Landslides, Springer

Seyček, J., 1978: Residual shear strength of soils. Bull Int Assoc Eng Geol-Bull Assoc Int Géologie Ing 17:73.

Schofield, A. N., 2005: Disturbed soil properties and geotechnical design. Thomas Telford.

Schofield, A. N., Wroth, P., 1968: Critical state soil mechanics. McGraw-Hill London.

Skempton, A. W., 1964: Long-term stability of clay slopes. Geotechnique 14: s. 77–102.

Skempton, A. W., 1970: First-time slides in overconsolidated clays. Geotechnique, 20(3), s. 320-324.

Skempton, A. W., 1985: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. Geotechnique 35: s. 3–18.

Stark, T. D., Eid, H. T., 1997: Slope stability analyses in stiff fissured clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(4), s. 335-343.

Stemberk, J., Mašín, D., Balek, J., Blahůt, J., Hartvich, F., Chaloupka, D., Kadlečík, P., Kalinová, R., Klimeš, J., Král, J., Kusák, M., Rott, J., Rybář, J., Špaček, P., Tábořík, P., 2016: Analýza příčin vzniku sesuvu na dálnici D8 u Dobkoviček https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Silnicni-doprava/Pozemni-komunikace/Analyza-pricin-vzniku-sesuvu-na-dalnici-D8-u-Dobko. Navštívené v máji 2020.

Terzaghi, K. V., 1936: The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In First international conference on soil Mechanics, 1936 (Vol. 1, s. 54-59).

Taylor, D. W., 1948: Fundamentals of soil mechanics (Vol. 66, No. 2, p. 161). LWW.

Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G., 1996: Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.

Tiedemann, B., 1937: Über die Schubfestigkeit bindiger Böden. Preuß. Versuchsanst. f. Wasserbau u. Schiffbau.

Tiwari, B., Marui, H., 2005: A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. J Geotech Geoenvironmental Eng 131: s. 1139–1150.

Vithana, S. B., Nakamura, S., Gibo, S., Yoshinaga, A., Kimura, S., 2011: Correlation of large displacement drained shear strength of landslide soils measured by direct shear and ring shear devices. Landslides, 9(3), s. 305-314.

Wood, D. M., 1990: Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge university press.

ÚČINNOSŤ HYDROFÓBNEHO NÁTERU POUŽITÉHO NA PIESKOVCI V ZÁVISLOSTI OD DOBY TVRDNUTIA

EFFECTIVENESS OF THE HYDROPHOBIC COATING APPLIED ON SANDSTONE DEPENDING ON THE CURING TIME

Lucia Dunčková, Tatiana Durmeková

Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky PRIF UK, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovenská republika,
e-mail: lucia.dunckova@uniba.sk, tatiana.durmekova@uniba.sk

Abstrakt: Hydrofóbne ošetrenie prírodných kameňov použitých na stavbách je možnosťou na predĺženie ich životnosti. V príspevku sú prezentované čiastkové výsledky laboratórneho skúšania účinku hydrofóbneho náteru Antipluviol S na hořickom pieskovci. Pozornosť je venovaná skúmaniu vplyvu času tvrdnutia náterov po ich aplikácii – porovnávané je dvojdňové a dvojtýždňové tvrdnutie náteru. Ako kontrolné skúšky účinnosti náterov s rozdielnou dobou tvrdnutia boli vykonané skúšky kapilárnej nasiakavosti. Z experimentu vyplynulo, že dĺžka tvrdnutia náteru na materiáli rozhodne ovplyvňuje účinnosť náteru. Množstvo kapilárne vsiaknutej vody do vzoriek s dvojdňovým tvrdnutím náteru dosahovalo hodnoty blízke množstvám kapilárnej nasiakavosti neošetrených vzoriek, zatiaľ čo náter s dvojtýždňovým tvrdnutím znížil kapilárnu nasiakavosť pieskovca o 89,8 %.

Abstract: A hydrophobic treatment of natural stones used on buildings is an opportunity to prolong their usable life. The paper presents partial results of laboratory testing of the effect of the hydrophobic coating Antipluviol S on Hořice sandstone. Attention is focused on the curing time effect of the coating after its application – 2 days and 2 weeks curing time is compared. The effectiveness of coatings with different curing times was tested by the test of water absorption by capillary absorption. The experiment showed that the curing time of the coating definitely affects the effectiveness of the coating. The amount of capillary infiltrated water into the two-day hardening samples reached values close to the amounts of capillary absorption of the untreated samples, while the two-week hardening coating reduced the capillary absorption of the sandstone by 89.8%.

Kľúčové slová: pieskovec, hydrofóbny náter, doba tvrdnutia, kapilárna nasiakavosť

Key words: sandstone, hydrophobic coating, curing time, capillary absorption

1. Úvod

Cieľom ošetrenia prírodných kamenných fasád či monumentov hydrofóbnymi činidlami (ochrannými vodovzdornými nátermi) je vytvoriť nepriepustný povrch pre kvapalnú vodu. Myšlienka hydrofóbnej úpravy kameňa vychádza z toho, že všetky procesy zvetrávania sú riadené či ovplyvňované prítomnosťou vody. Zníženie prieniku kvapalnej vody potom znižuje rýchlosť zvetrávania a chráni kameň pred vplyvom vonkajších činiteľov (Snethlage, 2011). Hydrofóbne nátery, vyrobené na báze silánov a siloxánov, čo sú chemické zlúčeniny s molekulami veľmi malých rozmerov, menia povrchové napätie minerálnych substrátov, vrátane betónu, omietky alebo tehlového muriva. Táto zmena povrchového napätia vytvára vodoodpudivosť, naimpregnovaný povrch je schopný zadržať vodu a vo vode rozpustné soli na povrchu (Syed a Donadio, 2013). Hydrofóbne činidlo zabraňuje prieniku tekutej vody do

ošetrovaného podkladu, zatiaľ čo difúzia vodnej pary prakticky nie je ovplyvnená, pretože hydrofóbne polysiloxánové filmy sú tak tenké, že neznižujú priemer tých pórov, ktoré sú zodpovedné za transport vodných pár (Snethlage, 2011).

Ako uvádzajú viacerí autori, kľúčovým parametrom na dosiahnutie cieľovej trvanlivosti je dostatočná hĺbka prieniku náteru do ošetrovaného materiálu (Snethlage, 2011; Syed a Donadio, 2013; Zhao a Meissener, 2017). Hĺbka prieniku náteru závisí od viacerých parametrov, ako pórovitosť materiálu, obsah vody alebo stupeň nasýtenia, čas kontaktu s náterom a s tým súvisiaca spotreba náteru (Johansson a kol., 2007). Bolo tiež preukázané, že kontrolou správnej miery spotreby náteru podľa cieľovej hĺbky prieniku, bude dosiahnutá nielen trvanlivosť náteru, ale aj úspora nákladov (Syed a Donadio, 2013).

Ukazuje sa, že okrem zabezpečenia dostatočnej hĺbky penetrácie náteru, dôležitú úlohu pri udržaní trvanlivosti náteru zohráva aj doba tvrdnutia alebo vytvrdzovania, t. j. doba nerušeného pôsobenia náteru po jeho aplikácii. Tento aspekt je skúmaný aj v predkladanom príspevku. Prezentované sú čiastkové výsledky laboratórneho testovania účinku hydrofóbneho náteru Antipluviol S na známom hořickom pieskovci, ktorý sa už oddávna hojne používa v stavebníctve ako stavebný, dekoračný alebo sochársky kameň. Pozornosť je venovaná práve vplyvu času vytvrdzovania náterov – porovnávané je dvojdňové a dvojtýždňové tvrdnutie náteru pri rovnakých podmienkach aplikácie náteru, a teda predpokladanej rovnakej hĺbke penetrácie. Účinnosť náterov s rozdielnou dobou tvrdnutia bola overovaná skúškou kapilárnej nasiakavosti. Nasiakavosť kapilaritou je jeden zo spôsobov, akým preniká voda z okolitého prostredia do stavebného materiálu. Voda sa pritom v materiáli pohybuje prostredníctvom kapilárnych síl v póroch určitej veľkosti aj proti účinkom gravitácie.

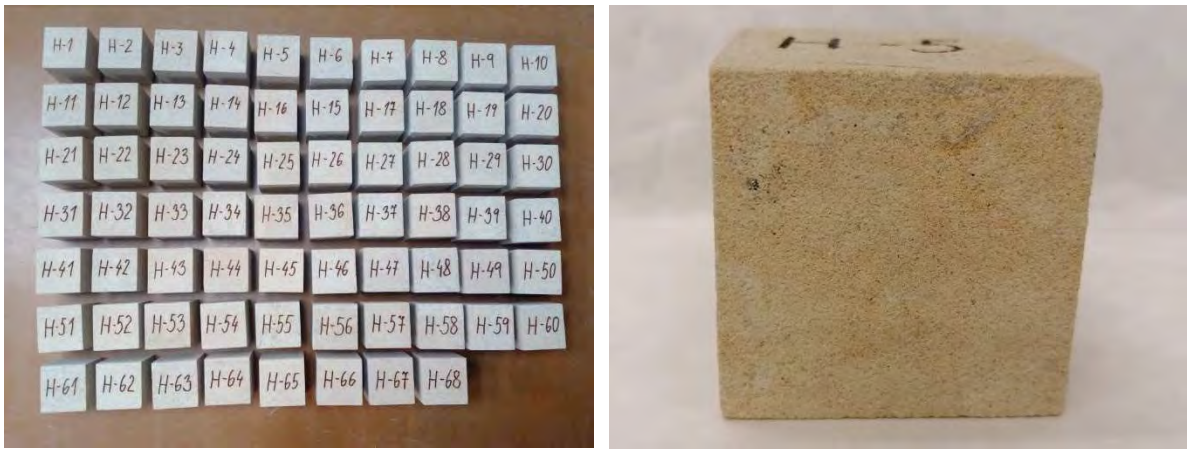
2. Materiál a metodika

Na kontrolu účinnosti impregnačného náteru bol zvolený dobre známy hořický pieskovec z Českej republiky, najmä z dôvodu jeho vysokej pórovitosti a schopnosti prijímať vodu a zároveň jeho stálosti vo vode. Hořický pieskovec bol v určitom období na Slovensku najrozšírenejším dekoračným kameňom, používaným najmä na verejných budovách, sochách a pomníkoch. Jeho spotreba dosiahla vrchol v 50. a 60. rokoch minulého storočia počas stavebného boomu po 2. sv. vojne (Pivko, 2019). Je to jemnozrnný pieskovec, farebne variabilný, najčastejšie svetlobéžový až žltastohnedý. Dominantným minerálom je kremeň (> 90 %), ostatné minerály sú minoritne zastúpené (glaukonit, živce, sľuda, ťažké minerály). Časté nepravidelné hrdzavé šmuhovanie je spôsobené limonitovým pigmentom. Intergranulárny cement je tvorený zmesou kaolinitu, illitu a jemných kremenných zŕn (Hasníková, 2013).

Bloky pieskovca na výskum boli odobraté z aktívneho lomu Podhorný Újezd v Podkrkonoší, ktorý je v súčasnosti najväčším pieskovcovým lomom v Českej republike. Z prinesených pieskovcových blokov boli rezaním pripravené skúšobné vzorky v tvare kocky s dĺžkou hrany 50 mm (obr. 1), na ktorých boli stanovené základné fyzikálne vlastnosti podľa štandardných postupov uvedených v technických normách:

- objemová hmotnosť ρ_d = 1,929 g.cm^{-3},
- celková pórovitosť n = 26,1 %,
- otvorená alebo efektívna pórovitosť n_o = 18,3 %,
- hmotnostná nasiakavosť N = 12 %,
- pevnosť v jednoosovom tlaku σ_c = 29,9 MPa.

Stanovené hodnoty vlastností vypovedajú, že ide o menej pevný (stredná pevnosť) a málo odolný pieskovec.



Obr. 1 Skúšobné vzorky hořického pieskovca
Fig. 1 Hořice sandstone specimens

Impregnačný náter Antipluviol S od talianskeho výrobcu MAPEI je bezfarebný hydrofóbny transparentný tekutý prípravok na báze siloxánovej živice. Podľa odporúčania výrobcu boli na jednu sadu suchých vzoriek nanesené dve vrstvy náteru v dvojhodinovom intervale. Doba tvrdnutia náteru, čiže čas, kedy je vzorka ponechaná pôsobeniu náteru na vzduchu bola zvolená 2 a 14 dní.

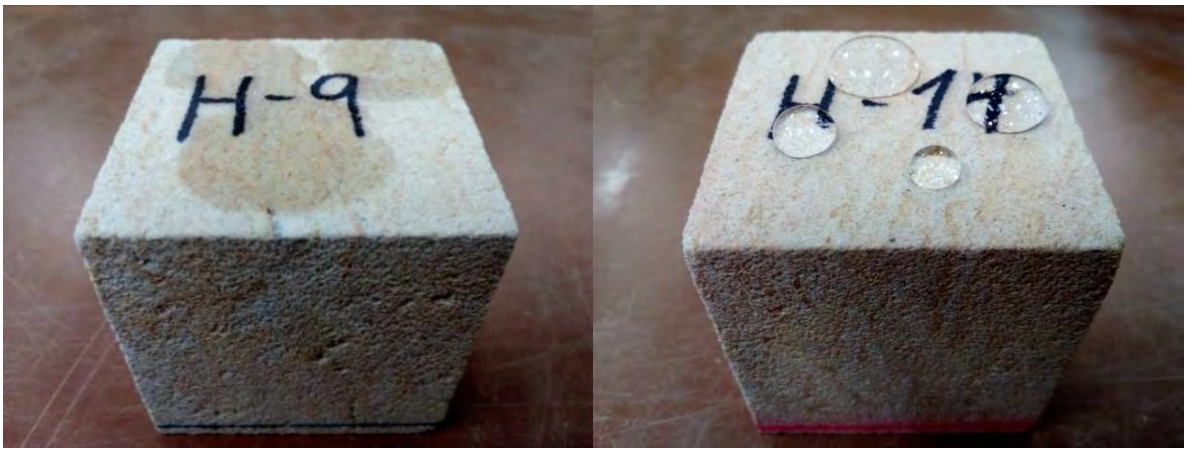
Efektivita či účinnosť náteru bola overovaná skúškami kapilárnej nasiakavosti, ktoré boli vykonané podľa postupu uvedeného v norme STN EN 1925. Pri tejto skúške boli vzorky ponorené do vody do výšky 3 ± 1 mm v plastovej nádrži na nesavých a neoxidujúcich podložkách. Časové intervaly na meranie nárastu hmotnosti v dôsledku absorbovanej vody kapilárnymi silami boli stanovené: 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 360, 480, 1 440 minút a potom každých 24 hodín po dobu 24 resp. 30 dní. V určených časových intervaloch sa vzorka zakaždým z vody vybrala, ponorená časť sa zľahka utrela vlhkou textíliou, odvážila s presnosťou na 0,01 g a ihneď vložila naspäť do nádoby. Skúška bola vyhodnotená graficky zostavením kriviek kapilárnej nasiakavosti, vyjadrujúcimi závislosť medzi hmotnosťou vody absorbovanou ponorenou plochou skúšobnej vzorky a určeným časom. Množstvo prijatej vody N_{kap} na zostavenie kapilárnych kriviek bolo stanovené podľa nasledujúceho vzorca:

$$N_{kap} = \frac{m_t - m_d}{A} \qquad [\mathrm{g/m^2}]$$

kde m_t je hmotnosť vzorky v čase t (g), m_d je hmotnosť vysušenej vzorky (g) a A je plocha kontaktnej základne vzorky s vodou v m^2.

3. Výsledky a diskusia

Účinok hydrofóbneho náteru na kockách hořického pieskovca je poukázaný na obr. 2. Náter spôsobuje vodoodolnosť (vodoodpudivosť) materiálu, čo znamená, že po jeho aplikácii prítomná voda nebude zvlhčovať horninu, ale ostane na povrchu vo forme kvapôčok, prípadne na zvislých plochách stečie po povrchu. Kocka vľavo s označením H-9 je bez impregnačného náteru a kvapky vody ihneď po aplikácii na vzorku vsiakli. Kocka vpravo H-14 je ošetrená náterom Antipluviolom S, povrch vzorky sa stal hydrofóbnym.



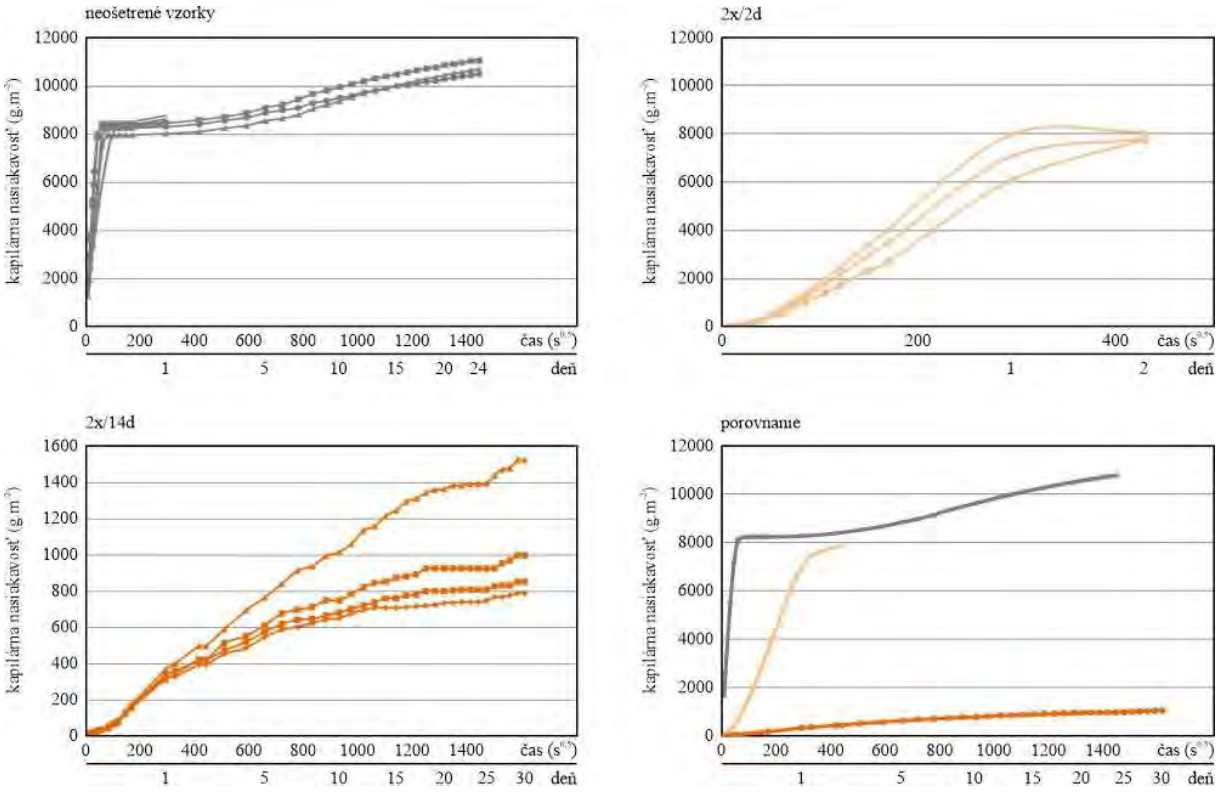
Obr. 2 Kocky hořického pieskovca, vľavo bez náteru, vpravo s náterom Antipluviol S
Fig. 2 Cubes of Hořice sandstone, untreated sample (left), sample protected by the Antipluviol S coating (right)

Skúšky kapilárnej nasiakavosti boli vykonané na neošetrených vzorkách a na dvoch skupinách vzoriek s nátermi s rozdielnou dobou vytvrdzovania. Na obr. 3 je zreteľne viditeľná účinnosť náteru Antipluviol S na vzorkách hořického pieskovca (H-33 až H-36), ktoré aj po cca 30 minútach pri 3 mm ponorení vo vode sú stále suché. V porovnaní s neošetrenými vzorkami H-37 až H-40 v prednom rade, na ktorých sú pekne viditeľné tmavé, vodou nasýtené časti vzorky, ktorú kocka prijala kapilárnym vzlínaním.

Obr. 3 Skúška kapilárnej nasiakavosti – rozdiel medzi absorpciou vody ošetrených vzoriek Antipluviolom S (H-33 až H-36) a neošetrených vzoriek (H-37 až H-40)
Fig. 3 Water absorption by capillarity – difference between sample protected by the Antipluviol S coating (H-33 to H-36) and untreated sandstones (H-37 to H-40)

Záznamy skúšok kapilárnej nasiakavosti vzoriek bez impregnácie, ako aj vzoriek s 2-dňovou a 14-dňovou dobou tvrdnutia náteru Antipluviol S sú znázornené na obr. 4. V každej skupine vzoriek pri zadefinovaných podmienkach boli skúšané 3 až 4 vzorky, ktorých správanie je zobrazené v čiastkových grafoch. Pri sérii vzoriek 2nátery/14dní sú viditeľné určité rozdiely v priebehoch kapilárnej nasiakavosti jednotlivých vzoriek, tieto nezrovnalosti môžu byť spôsobené heterogenitou jednotlivých vzoriek hořického pieskovca, resp. možnou miestami nedostatočnou impregnáciou náterom.

Z kriviek v súbornom porovnávajúcom grafe, ktoré vznikli spriemerovaním hodnôt kriviek v každej skupine vzoriek, vyplývajú nasledujúce skutočnosti. Náterom neošetrené vzorky veľmi rýchlo prijali veľké množstvo vody a do 1 hodiny od začatia skúšky dosiahli hodnotu kapilárnej nasiakavosti N_{kap} 8 100 g.m^{-2}, ktorá plynutím času ďalej rástla, ale už pomalšie a do konca trvania skúšky (24 dní) sa zvýšila na maximálnu hodnotu cca 10 800 g.m^{-2}. Náter na vzorke s dĺžkou tvrdnutia 2 dni (2x/2d) začal pomaly strácať svoju účinnosť hneď od prvého namočenia vzorky do vody a za kontrolované dva dni sa jeho hodnota kapilárnej nasiakavosti priblížila k hodnote 8 000 g.m^{-2}. Vzorky s dvojtýždňovým tvrdnutím náteru (2x/14d) mali podstatne spomalený priebeh absorpcie vody, náter sa ukázal od začiatku skúšky až po dobu nasledujúcich 30 dní účinný, maximálna hodnota N_{kap} je približne 1 100 g.m^{-2}.



Obr. 4 Priebeh kapilárnej nasiakavosti neošetrených vzoriek a vzoriek s použitím Antipluviolu S (2x/2d – 2 vrstvy náteru a 2 dni tvrdnutia náteru, 2x/14d – 2 vrstvy náteru a 2 týždne tvrdnutia náteru)
Fig. 4 Process of water capillary absorption untreated sandstones and sandstones with coating Antipluviol S (2x/2d – 2 layers of coating, 2 days curing time, 2x/14d – 2 layers of coating, 14 days curing time

Skúšky kapilárnej nasiakavosti ukázali, že účinnosť náteru je ovplyvnená dĺžkou tvrdnutia alebo vytvrdzovania náteru po jeho aplikácii na materiál. Podobne, ako je to pri výrobe betónu, ktorý požadované fyzikálno-mechanické parametre nadobúda až časom po potrebnej dobe zrenia. Realizácia experimentu na pieskovci potvrdila predpokladané výsledky a prispela k známym záverom iných výskumníkov, ktorí prezentujú, že čím je dlhší čas vytvrdzovania náteru od jeho aplikácie na materiál, tým je vodoodpudivosť vyššia (Zhao a Meissener, 2017; Soulios a kol., 2020; Bao a kol., 2020). Výrobca náteru Antipluviol S pritom neuvádza informáciu o dobe potrebnej na vytvrdnutie alebo zrenie, aby náter získal maximálnu účinnosť. Iný výrobca hydrofóbnych náterov, spoločnosť Wacker, odporúča minimálne dvojtýždňové vytvrdzovanie náteru (Soulios a kol., 2020).

Výsledky realizovaných skúšok preukázali, že doba tvrdnutia 2 týždne je aj pre náter Antipluviol S, použitý na vybranom pieskovci, dostatočne dlhá a pri takomto aplikačnom

postupe náter v dostatočnej miere ochraňuje materiál pred absorpciou vody. Kapilárna nasiakavosť bola znížená o 89,8 % oproti hodnote kapilárnej nasiakavosti neošetrených vzoriek. Skúšky preukázali, že dvojdňové tvrdnutie náteru je nedostatočné.

4. Záver

Jeden z dvoch kľúčových parametrov ovplyvňujúcich účinnosť ochranných hydrofóbnych náterov na prírodnom kameni bol skúmaný v prezentovanom výskume – doba tvrdnutia náteru po jeho aplikácii.

Z výsledkov realizovaných skúšok kapilárnej nasiakavosti na hořickom pieskovci vyplýva, že účinnosť náteru je okrem hĺbky prieniku ovplyvnená aj dĺžkou tvrdnutia alebo starnutia náteru použitého na materiáli. Náter s dĺžkou tvrdnutia 2 dni začal pomaly strácať svoju účinnosť hneď od prvého namočenia vzorky do vody a za 2 dni sa hodnota kapilárnej nasiakavosti takto ošetrenej vzorky blížila k hodnotám kapilárnej nasiakavosti neošetrenej vzorky. Dvojtýždňová doba tvrdnutia testovaného náteru Antipluviol S sa ukázala byť opodstatnená. Takýto postup pri aplikácii náteru má význam a zabezpečí, že náter v dostatočnej miere dlhšiu dobu ochraňuje kameň pred absorpciou vody. Kapilárna nasiakavosť bola znížená o 89,8 % oproti hodnote kapilárnej nasiakavosti neošetrených vzoriek. Pri aplikáciách náterov vo vonkajších podmienkach môže byť problémom výskyt dažďa, dlhšie obdobie sucha je často otázkou šťastia.

Zistenia prezentované v článku sú využiteľné i v praxi, keďže je predpoklad, že hořický pieskovec sa bude ťažiť aj v budúcnosti a bude naďalej často používaným kameňom. Jeho ošetrenie transparentnými vodovzdornými ochrannými nátermi môže predĺžiť jeho udržateľnosť a životnosť na stavbách, sochách, pomníkoch. Testovaný ochranný náter Antipluviol S pritom nemení podstatne vzhľad kameňa, vo veľkej miere zachováva jeho základnú farbu, prípadne farbu osvieži a zvýrazní textúrnu kresbu kameňa.

Poďakovanie

Tento príspevok vznikol s podporou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR, prezentované výsledky sú čiastkovými výstupmi riešenia grantov VEGA č. 1/0205/18 a 1/0503/19, ako aj grantu Univerzity Komenského v Bratislave pre mladých vedcov UK/28/2022.

Zoznam literatúry

Bao, J., Li S., Zhang, P., Xue S., Cui, Y.,e Zhao T., 2020: Influence of exposure environments and moisture content on water repellency of surface impregnation of cement-based materials. *Journal of Materials Research and Technology* 9 (6).

Hasníková, H., 2013: Testing mechanical properties of natural stones used as a building material. *Engineering mechanics*, Vol. 20(5), s. 427–435.

Johansson, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., Trägårdh J., 2007: Penetration depth for water repellent agents in concrete as a function of humidity, porosity and time. *Restoration of Buildings and Monuments,* 13(1), s. 3–16.

Pivko, D., 2019: Použitie hořického pískovce a iných dekoračných kameňov Česka na Slovensku. *Zpravodaj – Svaz kameníků a kamenosochařů České republiky z.s,* 2/2019, s. 10–14.

Snethlage, R., 2011: Stone Conservation. In: Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in Architecture. Properties, Durability*, 4th edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 511–523.

Soulios, V., Hansen, E., Feng, CH., Janssen H., 2020: Hygric behavior of hydrophobized brick and mortar sample. *Building and Environment* 176.

STN EN 1925: 2002 Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie súčiniteľa nasiakavosti kapilaritou.

Syed, A., Donadio M., 2013: Silane sealers/Hydrophobic impregnation – the European perspective. *Concrete Repair Bulletin*, september/october 2013.

Zhao, J., Meissener F., 2017: Experimental investigation of moisture properties of historic building material with hydrophobization treatment. *Energy Procedia* 132, s. 261–266.

VYUŽITIE TECHNOLÓGIE LiDAR PRI INŽINIERSKOGEOLOGICKOM MAPOVANÍ SVAHOVÝCH DEFORMÁCII V JUŽNEJ ČASTI SLANSKÝCH VRCHOV A KOŠICKEJ KOTLINY

USE OF LiDAR TECHNOLOGY IN ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING OF SLOPE DEFORMATIONS IN THE SOUTHERN PART OF SLANSKÉ VRCHY MTS. AND KOŠICE BASIN

Daniel Grega, Marián Stercz, Katarína Pačajová, Ľubomír Petro, Gabriela Bystrická, Martin Surový

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava, Slovenská republika, daniel.grega@geology.sk

Abstrakt: Oblasť Slanských vrchov a priľahlej časti Košickej kotliny má špecifickú geologickú stavbu, v dôsledku ktorej je toto územie intenzívne postihnuté rôznymi formami svahových deformácií. Kvalitu mapovania a registrácie týchto svahových porúch výrazne zlepšila technológia LiDAR. Táto technika umožňuje zachytiť aj najmenšie morfologické zmeny reliéfu, ktorými sa svahové deformácie prejavujú. Možnosti jej využitia boli v Slanských vrchoch aplikované v troch charakteristických zosuvných lokalitách. V lokalite Slanec bola analyzovaná bloková rozpadlina na okraji andezitového masívu stratovulkánu Bradlo, kde sa uvoľňujú a po plastickom podloží posúvajú horninové bloky. Interpretácia tohto javu je na základe LiDAR-u jednoznačná a presná. V prípade lokality Vyšný Čaj ide o aktívny prúdový zosuv v kvartérnych sedimentoch, ktorého ohraničenie v zarastenom teréne je na základe digitálneho modelu reliéfu DMR 5.0 výrazne presnejšie ako pri použití klasických metód. Poslednou lokalitou je aktívny zosuv v severnej časti obce Nižná Myšľa. Má plošný tvar a svojou hĺbkou zasahuje do neogénnych sedimentov stretavského súvrstvia. Zosuv je v teréne dokonale prístupný, ale jeho prejavy sú po rokoch od jeho aktivizácie zastreté a slabo čitateľné. LiDAR-ové snímky sú aj napriek časovému horizontu kontrastné a dobre využiteľné na presnú vektorizáciu ohraničenia tejto svahovej poruchy. Na základe praktických skúseností s rôznymi spôsobmi vizualizácie digitálneho modelu reliéfu, získaného na základe technológie LiDAR, sa nám javí ako najlepšie využiteľná kombinácia informačnej vrstvy *positive openness* so sklonom v odtieňoch červenej, nakoľko dáva vyniknúť aj malým zmenám reliéfu a veľmi dobre slúži ako podklad k interpretácii a vektorizácii vybraných geologických fenoménov.

Abstract: Area of Slanské vrchy Mts. and adjacent part of Košická kotlina Basin has a specific geological structure, as a result of which this area is intensively affected by various forms of slope deformations. The quality of mapping and registration of these slope failures has been significantly improved by LiDAR technology. This technique makes it possible to capture even the smallest morphological changes in the relief, which are the manifestation of slope deformation. Possibilities of its use have been applied in three characteristic landslide sites. In the Slanec locality, we analyzed the block disintegration on the edge of the andesite massif of the Bradlo stratovolcano, where in the course of external influences and the geological structure, blocks of rock are detached and moved along the plastic subsoil. The interpretation of this phenomenon based on DEM generated from LiDAR is unambiguous and accurate. In the case of the Vyšný Čaj locality, this is an active flow-like landslide in Quaternary sedi-

ments, where in overgrown terrain the geometry based on digital elevation model is much more accurate than by using of classical methods. The last location is an active landslide in the northern part of the village Nižná Myšľa. It has a planar shape and its depth extends into the Neogene sediments of the Stretava Formation. It is perfectly accessible in the field, nevertheless, its manifestations after the years of its activation are obscured and difficult to examine. Despite the time horizon, LiDAR images are contrasting and well usable for accurate vectorization of the boundary of this slope failure. Based on practical experience with various ways of visualization of the digital relief model, obtained on the basis of LiDAR technology, it seems to us that using the combination of positive openness layer with the slope shades in red color to be the best, as it expresses even small changes in relief and serves very well as a basis for interpretation and vectorization of selected geological phenomena.

Kľúčové slová: svahová deformácia, LiDAR, Slanské vrchy, Košická kotlina

Key words: slope deformation, LiDAR, Slanské vrchy Mts., Košická kotlina Basin

1. Úvod

Oblasť Slanských vrchov a priľahlej časti Košickej kotliny predstavuje z pohľadu inžinierskej geológie zaujímavé územie. Dôsledkom špecifickej geologickej stavby a pôsobenia eróznych procesov je toto územie intenzívne postihnuté svahovými deformáciami, ako sú zosuvy či blokové svahové poruchy.

Celé územie bolo v minulosti viackrát predmetom geologických výskumov so zameraním na inžinierskogeologické fenomény. Interpretácia výsledkov bola častokrát priamo úmerná formám a kvalite zobrazenia skúmaného územia, ktoré zase zodpovedali aktuálnym možnostiam vedeckého pokroku – čo samozrejme platí aj v súčasnej dobe. V posledných rokoch sa dostáva do popredia nová geodetická metodika, sľubujúca významné zlepšenie v tejto oblasti vedeckého výskumu – LiDAR.

2. Metodika LiDAR a jej využitie v praxi

LiDAR (z angličtiny *Light Detection And Ranging*) je metóda leteckého laserového skenovania, založená na meraní časového intervalu medzi vyslaním laserového lúča z vysielača v lietadle po jeho návrat vo forme odrazu od skenovaného objektu, v tomto prípade povrchu terénu. Na základe presných údajov o polohe vysielača (a prijímača) v čase vyslania lúča a tiež údajov o rýchlosti a smere pohybu lietadla je možné lokalizovať odrazové body s presnosťou 10-15 cm v horizontálnom aj vertikálnom smere. Nakoľko je prístroj schopný zmerať týmto spôsobom až 200 tisíc bodov za sekundu, vzniká tak množstvo (mračno) bodov, pokrývajúcich povrch terénu s veľkou hustotou. Po spracovaní sa môže toto mračno bodov interpolovať do podoby digitálneho modelu povrchu, či 3D modelov budov a iných objektov. Po aplikácii filtrov je možné z mračna bodov získať digitálny model reliéfu (napr. DMR 5.0). Práve DMR 5.0 nachádza svoje uplatnenie pri inžinierskogeologickom mapovaní svahových deformácii. Vďaka nemu vieme identifikovať rôzne geomorfologické formy a to aj na ťažko dostupných miestach, respektíve miestach pokrytých hustou vegetáciou. Na Slovensku zabezpečuje letecké laserové skenovanie Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR).

V nadväznosti na digitálny model reliéfu bolo vyvinutých množstvo vizualizačných techník, ktoré prispôsobujú vzhľad a formu výsledného zobrazenia DMR potrebám interpretácie. Všetky vychádzajú z vyššie uvedeného DMR 5.0. Na ich spracovanie sa veľmi často využívajú softvérové nástroje geografických informačných systémov (napr. ArcGIS Pro, Quantum GIS a pod.). Rôzne typy vizualizácie tak umožňujú zvýrazniť a vyzdvihnúť skryté

morfologické črty pozorovaných štruktúr, ako veľkosť, tvar, sklon či orientácia a zjednodušujú tak v konečnom dôsledku aj interpretáciu geologických fenoménov.

Asi najrozšírenejšou technikou je tieňovaný reliéf (*hillshading*) – intuitívna vizuálna technika vytvárajúca 3D efekt slnkom osvetlenej krajiny v odtieňoch sivej. Priestorový pocit výrazne umocňujú tiene, ktoré vznikajú aj na najmenších terénnych nerovnostiach. Zdroj svetla je možné modifikovať – dá sa nastaviť jeho azimut aj výškový uhol, dokonca je možné kombinovať viacero svetelných zdrojov.

Niektoré techniky pri vizualizácii imitujú difúzne osvetlenie. Jedna z nich, sky-view factor (SVF) nahrádza intenzitu difúzneho svetla pomerom veľkosti podielu oblohy viditeľnej z daného bodu k veľkosti vrchnej hemisféry. Hodnoty SVF sa pohybujú v intervale od 0 do 1, pričom hodnoty blízke 1 znamenajú, že je viditeľná takmer celá hemisféra (napr. vrcholová časť hrebeňa) a naopak hodnoty blízke nule indikujú miesto bez výhľadu na oblohu (napr. hlboký závrt a pod.).

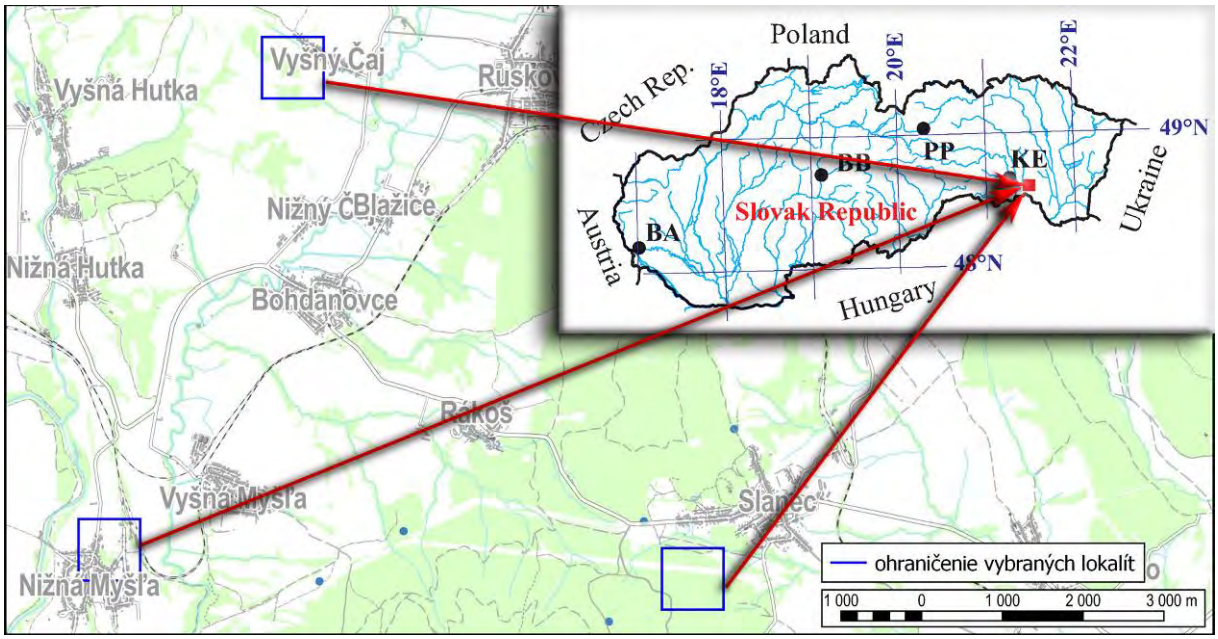
Podobnou technikou je openness (v preklade otvorenosť), ktorá je založená na odhade priemerného uhla výšky horizontu v rámci definovaného polomeru vyhľadávania (Yokoyama, 2002). Výsledná hodnota, ktorá nahrádza intenzitu difúzneho osvetlenia pre daný bod tak odráža priemernú hodnotu zenitového uhla všetkých určených horizontov.

Počítačové spracovanie umožňuje ľubovoľne kombinovať vizualizačné metódy v snahe zvýrazniť, resp. potlačiť požadované alebo nechcené vlastnosti tej-ktorej vizualizačnej metódy. Napríklad pre archeologický výskum bola vyvinutá metóda VAT (Visualization for Archaeological Topography), ktorá podľa špecifického kľúča kombinuje štyri informačné vrstvy do jediného obrazu (tieňovaný reliéf, sklon, sky-view factor a openness) (Kokalj, 2019). Pre účely inžinierskogeologickej praxe v oblasti registrácie svahových deformácii sa nám zatiaľ najviac osvedčila kombinácia informačnej vrstvy positive openness (modifikácia zvýrazňujúca konvexné formy reliéfu) so sklonom, ktorý ako kľúčový morfometrický parameter reliéfu zvýrazňuje 3D efekt a zlepšuje čítanie a interpretáciu obrazu, pričom vrstva sklonu sa primiešava v odtieňoch červenej farby (intenzita farby stúpa s veľkosťou sklonu).

3. Praktické využitie technológie LiDAR pri modelových lokalitách.

Vzhľadom na možnosti, ktoré poskytuje technológia LiDAR sa kvalita mapovania svahových deformácií výrazne zlepšila. Morfologické zmeny reliéfu krajiny, vznikajúce následkom svahových pohybov, predstavujú jeden z najvýznamnejších pozorovateľných prejavov ich existencie. Často je možné podrobným vyhodnotením kvalitného geodetického podkladu skúmaného územia zistiť množstvo dôležitých poznatkov a informácií o prítomnosti, charaktere, genéze či aktivite geodynamických javov. Tieto údaje sú neodmysliteľným podkladom pri riešení havarijných stavov, vznikajúcich v príčinnej súvislosti so svahovými pohybmi, pri zmierňovaní ich negatívnych následkov, resp. pri predchádzaní ich vzniku.

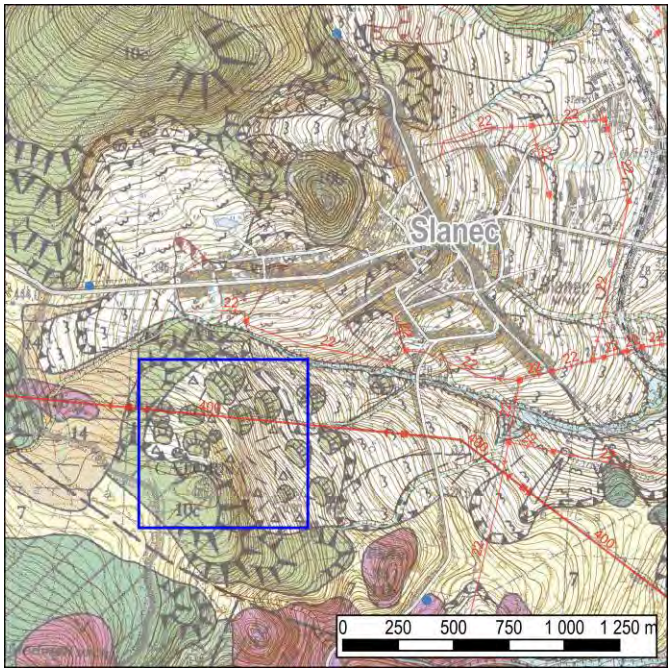
Za účelom ukázať možnosti využitia LiDAR-u pri vyhľadávaní, kvantifikácii a štúdiu svahových deformácií, sme vybrali niekoľko typových lokalít, ktoré svojím charakterom predstavujú najčastejšie druhy svahových deformácií, typických pre toto územie (obr. 1). Naším cieľom bolo prezentovať aj iné metódy, ktorými súčasná doba disponuje, porovnať ich možnosti a poukázať na výhody alebo nevýhody ich použitia.



Obr. 1 Prehľadná situácia vybraných lokalít
Fig. 1 Situation of the selected localities

3.1 Lokalita Slanec

Prvou z prezentovaných lokalít je územie v blízkosti obce Slanec. Územie má rozmery cca 760 x 760 m a jeho okraj leží zhruba 800 m juhozápadne od centra obce. V rámci predmetnej oblasti je zachytená len časť rozsiahleho zosuvu, ktorý začína ako bloková rozpadlina na okraji skalného masívu stratovulkánu Bradlo, pokračuje ako blokové pole a následne ako veľký plošný zosuv, ktorý podľa aktivity možno charakterizovať ako potenciálny. Okolie obce Slanec bolo z inžinierskogeologického hľadiska prvýkrát skúmané v 80-tych rokoch minulého storočia v súvislosti s plánovanou IBV. Podrobnejšie a systematicky bolo územie skúmané v rámci registrácie svahových deformácií v roku 1991 (Modlitba, 1991). Územím sa neskôr zaoberalo viacero autorov, z ktorých možno spomenúť napr. Grmanová a kol. (1999); Míka a Bolha (2000); Petro a kol. (1993) a ďalší.



Obr. 2 Výrez z mapy svahových deformácií
Fig 2 Excerpt from the map of landslides

V rokoch 1991 – 1992 prebiehali na lokalite prieskumné a monitorovacie práce, nakoľko blízkym územím prechádza trasa dôležitých podzemných a nadzemných vedení celoštátneho významu, medzi inými päť vetiev tranzitného plynovodu, dve vetvy medzinárodného ropovodu Družba, telekomunikačné a optické vedenia a vedenie VVN.

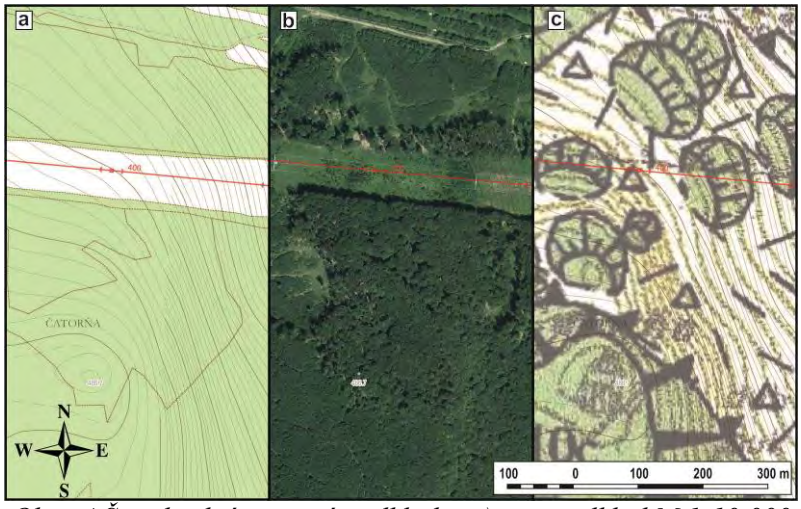
V roku 2000 boli v širšom okolí realizované rozsiahle sanačné práce zamerané na stabilizáciu zosuvného územia, ktorým prechádzajú vyššie spomínané inžinierske siete. Hydrogeologické drenážne a pozorovacie vrty realizované v rámci týchto sanačných prác sa stali predmetom monitoringu, ktorý pokračuje aj v súčasnosti. Lokalita bola zaradená do projektu Čias-

tkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia, ktorý je riešený Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra a financovaný zo štátneho rozpočtu (MŽP SR).

Samotný skúmaný zosuv je súčasťou rozsiahlej, zloženej svahovej deformácie. Podľa výsledkov predchádzajúcich prieskumov (Grmanová, 1999), celková rozloha oblasti postihnutej touto svahovou deformáciou presahuje 6 km^2 (obr. 2). V našom prípade je však predmetom záujmu len jej najvyššia časť – blokové rozpadliny a blokové pole.

Obr. 3 Pohľad na zosuv od Slanca z dronu
Fig. 3 View of the landslide from a drone

Všeobecne tvoria blokové rozpadliny v Slanských vrchoch súvislú obrubu okolo materského masívu. V mieste skúmaného zosuvu ide o vulkanické a vulkanoklastické horniny vrchu Bradlo – vrcholovej časti stratovulkánu Bradlo (Kaličiak, 1996). Pôsobením erózie sa na okraji tektonicky porušeného skalného masívu postupne odlamujú bloky horniny a vplyvom gravitácie sa posúvajú po plastickom a mäkkom podloží. Veľkosť týchto blokov je rôzna, môže však dosahovať hrúbku aj niekoľko desiatok metrov. Plastické podložie tvoria neogénne sedimenty stretavského súvrstvia, ktorých hlavnými zložkami sú íly, piesky a tufy. V reliéfe sa jednotlivé bloky prejavujú ako skalné ihly a pahorky. Depresie medzi jednotlivými blokmi bývajú často zamokrené (Dzurovčin, 1990). Kvartérne sedimenty sú tu zastúpené predovšetkým deluviálnymi sedimentami charakteru ílov a sutín.

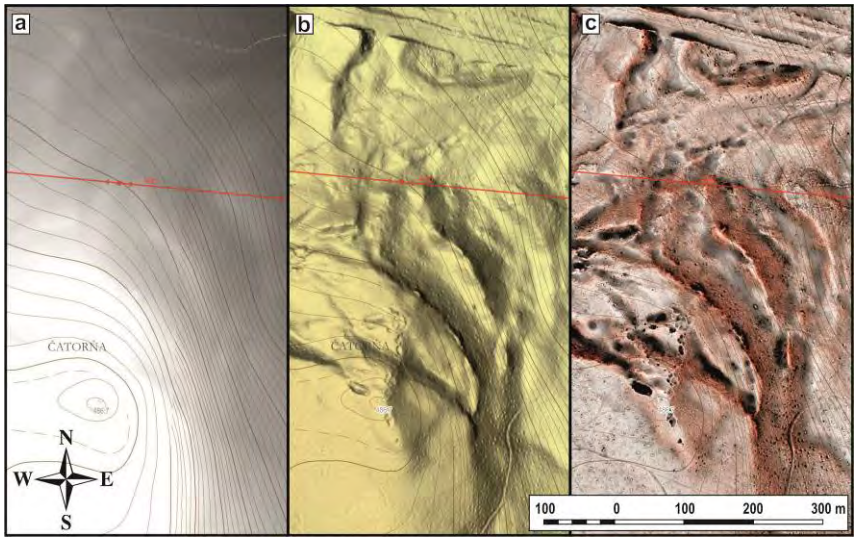


Obr. 4 Štandardné mapové podklady: a) topopodklad M 1:10 000 ZM; b) ortofotomapa; c) mapa svahových deformácií
Fig. 4 Standard basemaps: a) topo basemap M 1: 10,000; b) orthophotomap; c) map of landslides

Presné reálne vymedzenie svahovej deformácie v predmetnej oblasti je pomerne zložité. Veľkosť samotného zosuvu a jednotlivých blokov neumožňujú utvoriť si celkový obraz pre pochopenie pozorovaných geologických fenoménov, GPS lokátory vzhľadom na husté zalesnenie terénu vykazujú len veľmi nízku presnosť. Kvôli celkovému pohľadu na predmetné územie sme otestovali aj použitie dronu a nafotili svahovú deformáciu z výšky 120 m (najvyššia povolená letová hladina pre prevádzku malých bezpilotných zariadení) (obr. 3).

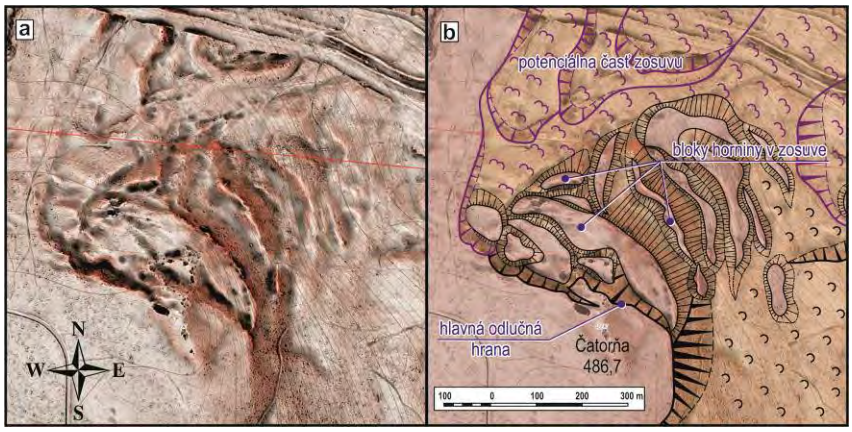
Po analýze výsledkov doteraz štandardne používaných klasických prístupov k mapovaniu a zobrazovaniu terénu (mimo LiDAR) sme dospeli k názoru, že žiadna z používaných metód nedokáže poskytnúť obraz situácie s požadovanou presnosťou a jasným zobrazením dôležitých detailov. Pre porovnanie sú na obrázku (obr. 4) podklady štandardne využívané pri

mapovaní – výrez z topopodkladu základnej mapy 1:10 000 (a), ortofotomapa tej istej časti územia (b) a nakoniec mapa svahových deformácií (c), ktorá bola vydaná v mierke 1: 25 000 (Grmanová, 1999) a ktorá je v danej lokalite jediným relevantným inžinierskogeologickým podkladom, zaoberajúcim sa tematikou zosuvov.



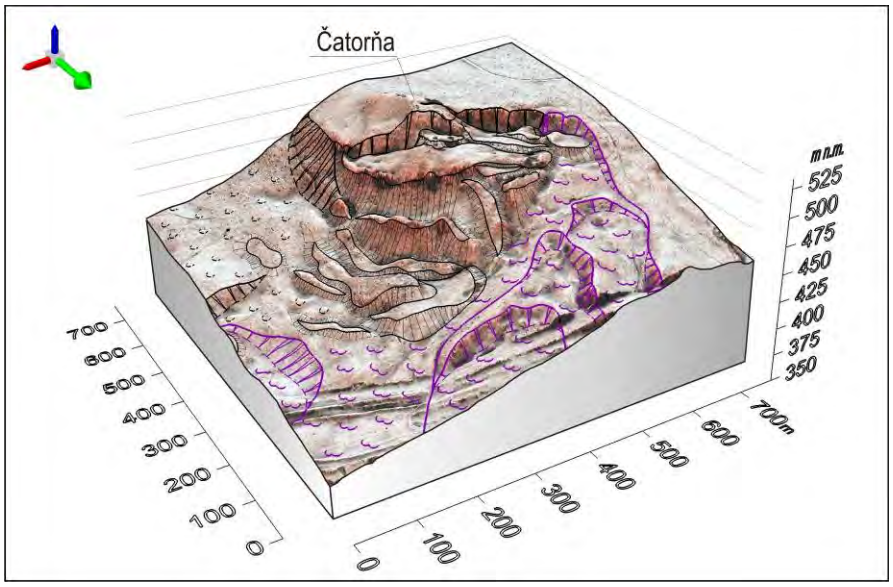
Obr. 5 Príklady foriem vizualizácie: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness v kombinácii so sklonom
Fig. 5 Examples of visualizations: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness in combination with slope

Pri výbere najvhodnejšej vizualizácie DMR 5.0 z LiDAR-ových údajov sme vyskúšali viacero techník a ich kombinácií (obr. 5). Na obrázku sú pre porovnanie zobrazené tri rôzne formy vizualizácie – digitálny model reliéfu v odtieňoch sivej (a), hillshading v odtieňoch sivej v kombinácii s nadmorskou výškou, ktorá je vo farebnej škále od hnedej cez žltú až po tmavozelenú (b) a kombinácia informačnej vrstvy positive openness so sklonom v odtieňoch červenej (c). Posledná uvedená technika sa nám javí ako najlepšie využiteľná, nakoľko dáva vyniknúť aj malým zmenám reliéfu a veľmi dobre slúži ako podklad k interpretácii a vektorizácii vybraných geologických fenoménov (obr. 6).



Obr. 6 Interpretácia svahovej deformácie: a) podkladová informačná vrstva; b) vykreslená svahová deformácia
Fig. 6 Interpretation of slope deformation: a) underlying information layer; b) plotted slope deformation

Na obrázku 6 je pre porovnanie zobrazené skúmané územie bez interpretácie (a) a s inžinierskogeologickou interpretáciou svahovej deformácie (b), ktorá bola spracovaná na základe LiDAR-ových podkladov. Ako vidieť, severovýchodne od kóty Čatorňa sú interpretované výrazne ohraničené blokové rozpadliny značných rozmerov, ktoré smerom do údolia prechádzajú do blokového poľa. Tvar jednotlivých blokov v tomto prípade nie je stĺpcovitý – ich šírka niekoľkonásobne prevyšuje hrúbku bloku a dosahuje 250 až 350 m – vytvára akúsi rebrovú štruktúru, ktorá je na použitej informačnej vrstve veľmi dobre rozoznateľná. Pokiaľ porovnáme interpretáciu svahovej deformácie na základe LiDAR-ových podkladov so staršími inžinierskogeologickými podkladmi (obr. 2), vidíme podstatný rozdiel



Obr. 7 3D model zosuvnej lokality pri obci Slanec
Fig. 7 3D model of landslide locality close to the village Slanec

v presnosti vykreslenia jednotlivých segmentov svahovej deformácie, ako sú napr. bloky andezitu v zosuve a pod.

Ďalšou výhodou spracovaného DMR 5.0 oproti starším podkladom je možnosť vytvoriť realistický 3D model zosuvného územia, ktorý dokáže veľmi plasticky znázorniť aktuálny stav skúmanej svahovej deformácie (obr. 7).

3.2 Lokalita Vyšný Čaj

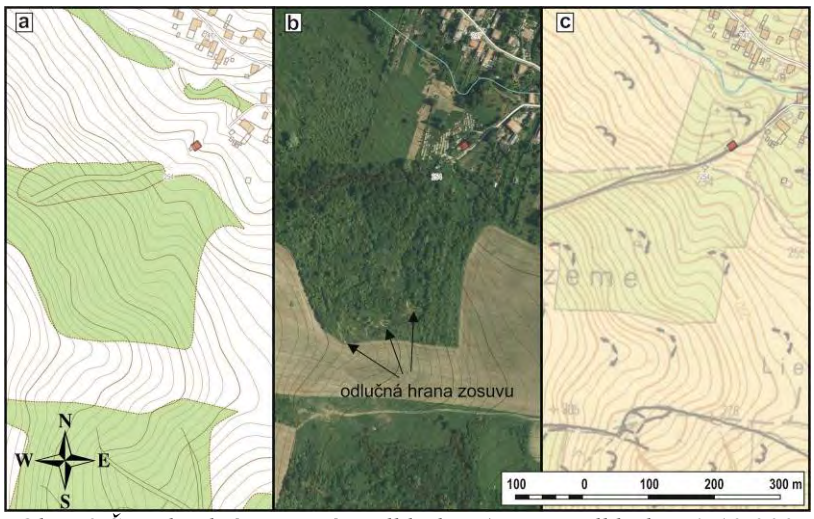
Ako ďalšiu typovú lokalitu sme vybrali zosuvné územie v blízkosti obce Vyšný Čaj. Zvolené územie vo svojej severovýchodnej časti čiastočne zasahuje do intravilánu obce. Dokumentovaná svahová deformácia sa nachádza cca 500 m na ZJZ od centra obce a podľa jej charakteru ju možno zaradiť do kategórie prúdových zosuvov. V tomto prípade ide o jednoduchý aktívny zosuv s relatívne plytko situovanou šmykovou plochou. Tá sa vytvorila na rozhraní deluviálnych hlín a neogénneho podložia, ktoré tvoria ílovité sedimenty stretavského súvrstvia. Má rotačno-planárny charakter a jej predpokladaná hĺbka nepresahuje 10 m.

Rozmermi nie je tento zosuv veľmi rozsiahly, jeho dĺžka je cca 300 m a šírka okolo 100 m, je však, ako je to v tejto oblasti bežné, súčasťou rozsiahlej kombinovanej svahovej deformácie s plochou cca 1,7 km^2. Nachádza sa na okraji poľnohospodársky obrábanej časti svahu a areálu cintorína, má zvlnený, stupňovitý povrch, je veľmi husto zarastený krovinami a stromami a preto je ťažko prístupný (obr. 8).

Prvýkrát bol zosuv registrovaný v roku 1990 ako súčasť výsledkov registrácie svahových deformácií (Modlitba, Petro, 1990). Svojou aktivitou, ktorá sa vystupňovala v r. 2010, ohrozoval miestnu infraštruktúru a časť zástavby obce (Grman, 2010) a preto bol zaradený do programu sanácií životného prostredia. Po roku 2010 boli nakoniec na lokalite sanačné práce aj realizované. Zamerané boli predovšetkým na hydrogeologické faktory – odvodňovacie a pozorovacie hydrogeolo-

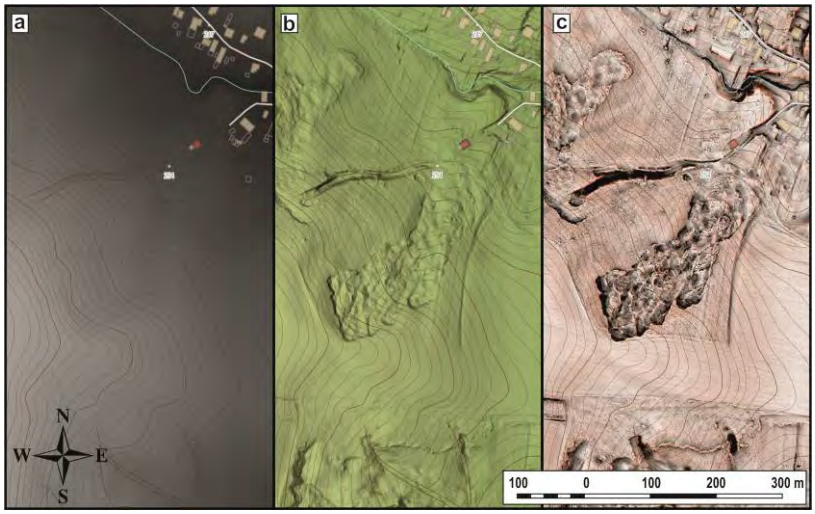
Obr. 8 Pohľad na zosuvné územie z dronu a detail odlučnej hrany
Fig. 8 View of the landslide from a drone

gické vrty a povrchové odvodňovacie rigoly. V súčasnosti je územie pravidelne monitorované v rámci projektu Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia, ktorý je riešený Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra.



Obr. 9 Štandardné mapové podklady: a) topopodklad M 1:10 000 ZM; b) ortofotomapa; c) mapa svahových deformácií
Fig. 9 Standard map materials: a) topo basemap M 1: 10,000; b) orthophotomap; c) map of landslides

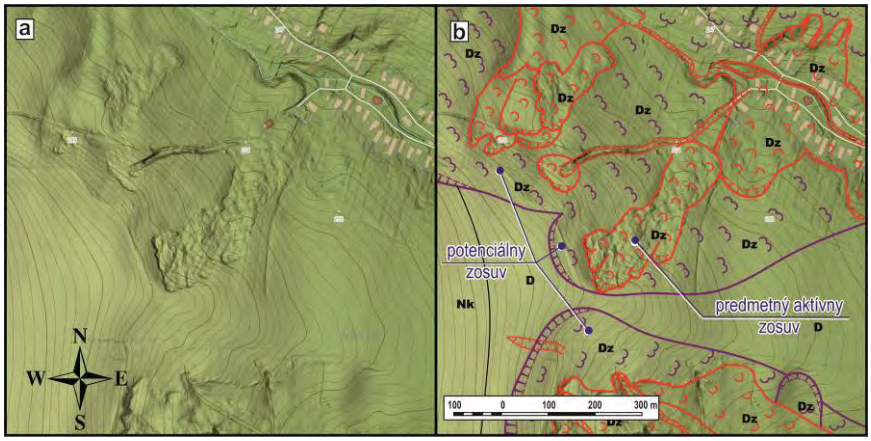
Presné polohopisné zakreslenie zosuvu v predchádzajúcom období nebolo zrealizované. Ako je zjavné z obrázka (obr. 9), táto svahová deformácia nie je zreteľne viditeľná ani v ortofotomape, hoci terén nie je zalesnený, len zarastený krovinami. V hornej časti zosuvu je čiastočne odkrytá zložená odlučná hrana zosuvu, dobre viditeľná aj na fotografiách z dronu (obr. 8). Celkový tvar zosuvu však vzhľadom na krovinami husto zarastený povrch územia zaniká. Topografický podklad, ktorý bol vyhotovený v druhej polovici minulého storočia túto svahovú deformáciu vôbec nezachytáva. Čo sa týka preskúmanosti, dotknuté územie nebolo v minulosti súčasťou inžinierskogeologického výskumu, ktorý by viedol k vytvoreniu relevantného mapového diela. Jediné inžinierskogeologické podklady z tejto lokality sú pracovné mapy inžinierskych geológov, ktorí mapovali toto územie za účelom registrácie svahových deformácií koncom minulého storočia (Spišák, 1988). V tomto období buď zosuv ešte nebol vyvinutý alebo ušiel pozornosti mapujúcich geológov, nakoľko v pracovných mapách ako aktívna svahová deformácia chýba.



Obr. 10 Príklady foriem vizualizácie: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness v kombinácii so sklonom
Fig. 10 Examples of visualizations: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness in combination with slope

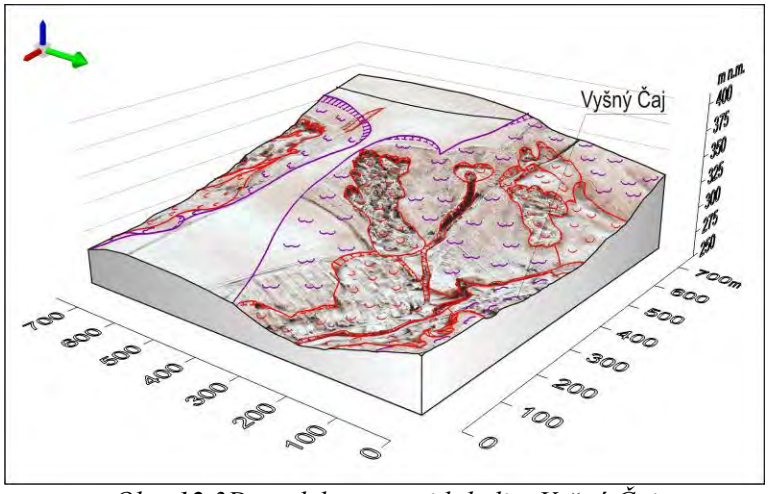
Naproti tomu v podkladoch z LiDAR-u je zosuv ostro ohraničený a je možné dobre rozoznať jeho odlučnú, transformačnú aj akumulačnú časť. Je dobre rozoznateľný v informačnej vrstve hillshading (obr. 10) a najmä v positive openness v kombinácii so sklonom, ktorá je ideálna ako podklad pre vektorizáciu hraníc svahovej deformácie. Vzhľadom na presnosť DMR 5.0 je ohraničenie zosuvu na základe týchto podkladov omnoho presnejšie ako vkladanie hranice v teréne pomocou ručných GPS prístrojov (dokonca aj presné geodetické prístroje v krovinatom teréne zvyknú vykazo-

vať nižšiu presnosť, nehľadiac na to, že výsledky meraní nie sú spojité a priechodnosť terénom je mizivá).



Obr. 11 Interpretácia svahovej deformácie: a) podkladová informačná vrstva; b) vykreslená svahová deformácia
Fig. 11 Interpretation of slope deformation: a) underlying information layer; b) plotted slope deformation

Interpretácia zosuvu (obr. 11) na podklade informačnej vrstvy hillshading plasticky dopĺňa čiarovú interpretáciu hraníc zosuvu. Ohraničenie aktívnej časti je veľmi výrazné a dobre interpretovateľné, hranica potenciálnej časti je už menej výrazná. Jej vykreslenie je v tomto prípade subjektívne, ovplyvnené skúsenosťou geológa, ako aj dodatočnými informáciami o charaktere územia z predchádzajúcich prieskumov či terénneho mapovania.



Obr. 12 3D model zosuvnej lokality Vyšný Čaj
Fig. 12 3D model of landslide locality Vyšný Čaj

Celkový realistický pohľad na lokalitu je na obrázku (obr. 12). Spracovanie priestorových údajov do 3D modelu poskytuje realistickejší náhľad na problematiku zosuvov, ich genézu a priestorový rozsah vzhľadom na sklonové pomery lokality. Čítanie informácií z 3D modelu je omnoho intuitívnejšie ako z mapového podkladu, napriek tomu že mapa zvyčajne obsahuje aj údaje o nadmorských výškach formou vrstevníc.

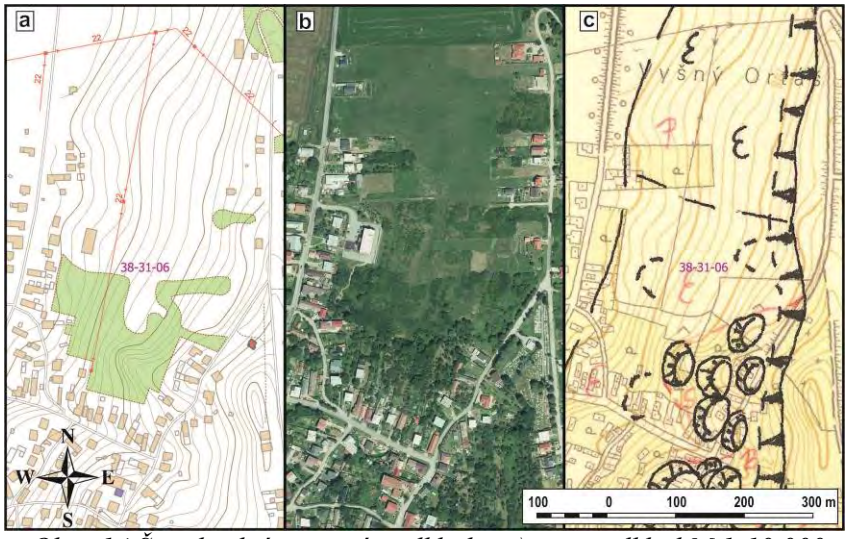
3.3 Lokalita Nižná Myšľa

Poslednou lokalitou je zosuvné územie v severnej časti obce Nižná Myšľa. Vybraný zosuv sa nachádza na lúke v blízkosti miestnej základnej školy. Má rozmery približne 380 metrov na šírku a 240 metrov na dĺžku.

Z hľadiska kategorizácie ide o aktívnu recentnú svahovú deformáciu typu zosúvania. Prejavuje sa zvyčajne relatívne rýchlym, kĺzavým pohybom pozdĺž jednej alebo viacerých šmykových plôch. Svah, na ktorom zosuv vznikol má západnú expozíciu a sklon cca 5-7°. Povrch zosuvu je nerovný, zvlnený, miestami stupňovitý s početnými zamokreninami. V súčasnosti je zarastený krovinami a vlhkomilnou vegetáciou. Miestami sú zreteľná aj okraje svahovej deformácie. Šmyková plocha je zložená, rotačno-planárna a podľa výsledkov prieskumu bola v hornej časti zosuvu overená v hĺbke až 20 m p.t.

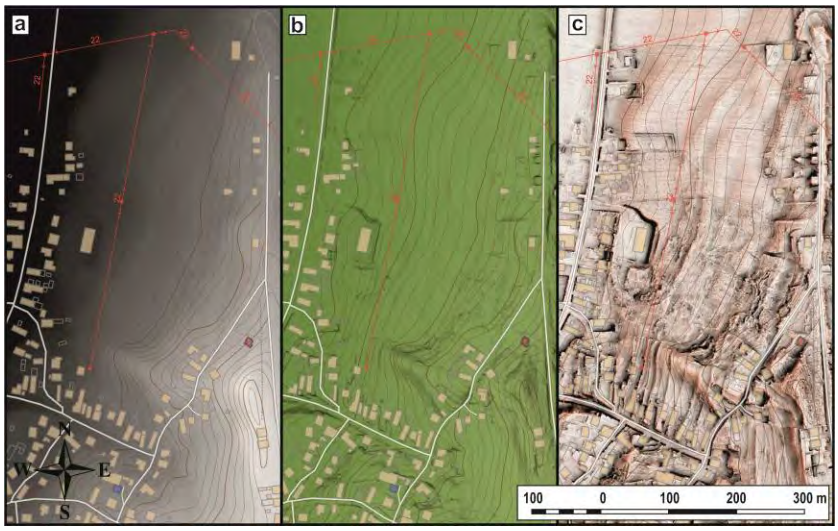
Obr. 13 Pohľad na zosuv z dronu
Fig. 13 View of the landslide from a drone

Na rozdiel od lokality Vyšný Čaj je zosuvná masa okrem kvartérnych delúvií tvorená aj neogénnymi sedimentami stretavského súvrstvia. Základným predpokladom vzniku zosuvu je geologická stavba územia. Medzi ďalšie faktory patria sklonitosť terénu, antropogénne zásahy v území a v neposlednom rade aj hydrogeologické a hydrologické pomery – práve extrémne atmosférické zrážky boli príčinou reaktivizácie zosuvu v roku 2010. K aktivizácii pohybu môžu prispieť tiež úniky vody zo žúmp, septikov, porušeného vodovodu, kanalizácie ako aj nedokonalé odvádzanie zrážkových vôd.

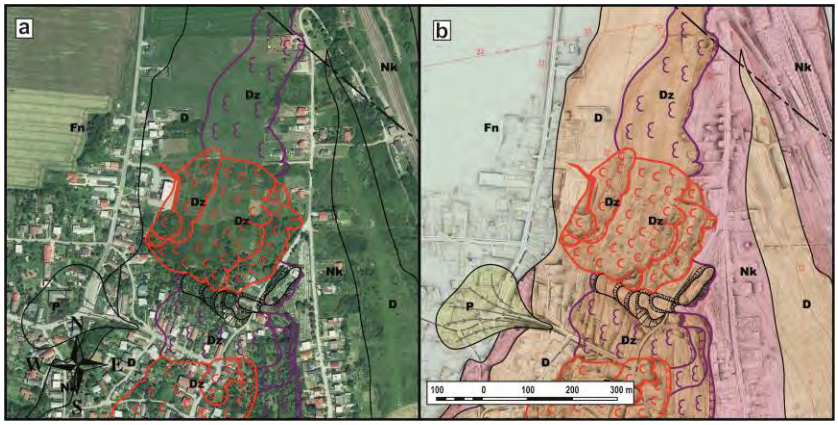


Obr. 14 Štandardné mapové podklady: a) topopodklad M 1:10 000 ZM; b) ortofotomapa; c) mapa svahových deformácií
Fig. 14 Standard map materials: a) topo basemap M 1: 10,000; b) orthophotomap; c) map of landslides

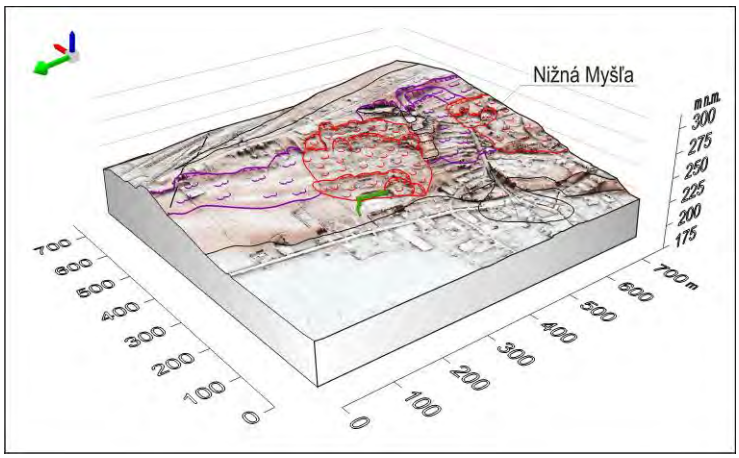
Inžinierskogeologické prieskumy, realizované v tejto lokalite v minulosti, boli zamerané hlavne na overovanie základovej pôdy pre účely výstavby. Z regionálneho hľadiska sa lokalitou zaoberali Kaličiak (1996) a Malgot (1975). V rámci zostavovania inžinierskogeologickej mapy južnej časti košicko-šarišského regiónu to bol tiež Spišák a kol. (1988). Zmena nastala po roku 2010, keď po výdatných atmosférických zrážkach začiatkom júna došlo k aktivizácii a vzniku zosuvu s katastrofálnymi následkami. V súvislosti s touto udalosťou došlo k zničeniu majetku a aj k ohrozeniu životov miestnych obyvateľov. Týmto zosuvom sa zaoberali napríklad Tometz a kol. (2010) alebo Petro a kol. (2014). V súčasnosti je lokalita monitorovaná v rámci geologickej úlohy „Monitoring zosuvných deformácií“, ktorá je od roku 2018 riešená Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra v rámci Operačného programu Kvalita životného prostredia. Ukončenie úlohy je naplánované na rok 2023.



Obr. 15 Príklady foriem vizualizácie: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness v kombinácii so sklonom
Fig. 15 Examples of visualizations: a) DMR; b) hillshading; c) positive openness in combination with slope



Obr. 16 a) interpretácia zosuvov na ortofotomape; b) účelová IG mapa;
Fig. 16 a) interpretation of landslides; b) special EG map



Obr. 17 3D model zosuvnej lokality Nižná Myšľa
Fig. 17 3D model of landslide locality Nižná Myšľa

Ako bolo spomenuté, lokalita je pokrytá vegetáciou. Od roku 2010 pomaly dochádzalo k premodelovávaniu terénu a pôvodne výrazné znaky zosúvania boli časom zastreté. Pri pohľade na ortofotomapu je prakticky nemožné zosuv jednoznačne ohraničiť. To isté platí pri pohľade na snímok z dronu. Pôvodne výrazná, zreteľná odlučná hrana je postupom času menej viditeľná a problematicky rozoznateľná aj priamo v teréne pri inžinierskogeologickom mapovaní.

Oveľa lepšie výsledky dostávame pri použití LiDAR-u. Vyššie spomínaná odlučná hrana v pravej časti obrázka pod cestou je pri pohľade z dronu len málo výrazná, na LiDAR-ových podkladoch však dobre zreteľná. Na obrázku (obr. 15) sú tri príklady vizualizačných informačných vrstiev – digitálny model reliéfu v odtieňoch sivej (a), hillshading v odtieňoch sivej v kombinácii s nadmorskou výškou v štandardnej farebnej škále (b) a kombinácia informačnej vrstvy positive openness so sklonom v odtieňoch červenej (c). Práve posledná vizualizácia nám veľmi zreteľne zobrazuje spomínanú odlučnú hranu v dobrom kontraste s okolitým terénom.

Výsledky interpretácie zosuvného územia na báze LiDAR-u sa dajú možné využiť napríklad na zobrazenie ohraničenia svahovej deformácie v ortofotomape (a) alebo na zostavenie mapy inžinierskogeologickej rajonizácie (b) či 3D modelu (obr. 17).

4. Záver

Na troch vybraných lokalitách sme prezentovali možnosti technológie LiDAR pri riešení problematiky svahových deformácií. Zistili sme, že táto technológia môže byť obrovským prínosom pre vyhľadávanie, mapovanie aj vektorizáciu svahových deformácií. Ako najvhodnejšia alternatíva z prezentovaných možností sa javí metóda zobrazenia *positive openness* v kombinácii so sklonom svahu v odtieňoch červenej farby. Jej výhodou je, že dobre vystihuje a ostro ohraničuje aj nepatrné morfologické zmeny.

Zoznam literatúry

Dzurovčin, L., 1990: Produkty svahovej modelácie v strednej a južnej časti Slanských vrchov. Geografický časopis, 42, s. 172-188

Grman, D., Boszaková, M., Magdošová, M., Ondrejka, J., Potančok, L., Syčevová, M., Takáč, P., Udič, P., Dvořák, M., Ádámová, M., 2010: Inžinierskogeologický prieskum havarijných zosuvov v Košickom kraji. MŽP SR, Bratislava, GEO Slovakia, s. r. o., Košice. Manuscript – Geofond, Bratislava, 22 s.

Grmanová, V., Gomolčák, M., Halešová, A., Szabová, A., 1999: Svahové poruchy okraja Slanských vrchov, orientačný inžinierskogeologický prieskum. Manuskript – Geokonzult Košice, 185 s.

Kaličiak, M. (ed.), Baňacký, V., Bodnár, J., Dubéciová, A., Jacko, S., Janočko, J., Jetel, J., Karoli, S., Petro, Ľ., Spišák, Z., Syčev, V., Zlinská, A., 1996: Vysvetlivky ku geologickej mape Slanských vrchov a Košickej kotliny – j. časť v mierke 1:50 000. Vyd. D. Štúra, Bratislava, s. 176-184.

Kokalj, Žiga and Maja Somrak 2019. Why not a single image? Combining visualizations to facilitate fieldwork and on-screen mapping. Remote Sensing 11 (7): 747.

Malgot, J., 1975: Gravitačné deformácie svahov na okrajoch vulkanických pohorí Slovenska. Geografický časopis, 27, s. 216-226

Modlitba, I., Jánová, V., Kováčik, M., Krippel, M., Liščák, P., Petro, Ľ., Spišák, Z., Vančíková, I., Iglárová, Ľ., Lobík, M., Šarík, M., Ondrášik, M., 1991: Výsledky registrácie svahových deformácií na území Slovenska v roku 1991. Manuskript – ŠGÚDŠ Košice, s. 57-62.

Míka, R., Bolha, Ľ., 2000: Záverečná správa z podrobného inžinierskogeologického prieskumu „Slanec“. Manuskript – archív SPP Bratislava, 15 s.

Petro, Ľ., Jánová, V., Žilka, A., Ondrejka, P., Liščák, P., Balík, D., 2014: Catastrophic landslide in Nižná Myšľa village (Eastern Slovakia). In: K. Sassa, P. Canuti & Y. Yin (Eds.) „Landslide Science for a Safer Geoenvironment“, Vol. 3 Targeted Landslides, s. 305-311. Publ. Springer, Switzerland. ISBN 978-3-319-04995-3.

Petro, Ľ., Spišák, Z. a Polaščinová, E., 1993: Súbor inžinierskogeologických máp 1:50 000 – región Košická kotlina a Slanské vrchy. Čiastková záverečná správa v rámci úlohy “Súbor regionálnych máp geologických faktorov životného prostredia 1:50 000 regiónu Košická kotlina a Slanské vrchy”. Manuskript – Geofond Bratislava, 103 s.

Spišák, Z., Petro, Ľ., Polaščinová, E., Klukanová, A., 1988, Inžinierskogeologická mapa južnej časti košicko-šarišského regiónu (Košice, juh), ŠGÚDŠ Bratislava

Tometz, L., Blišťan, P., Harabinová, S., Leššo, J., Nyárhidy, J., Turovský, F.: Nižná Myšľa – havarijný zosuv, inžinierskogeologický prieskum. Manuskript GEOTON s.r.o., Košice, 2010, 59 s.

Yokoyama, R., Shlrasawa, M., Pike, R. J., 2002. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68: s. 251–266.

STANOVENIE ŠMYKOVÝCH A DEFORMAČNÝCH VLASTNOSTÍ HRUBOZRNNÝCH ZEMÍN POMOCOU TERÉNYCH A LABORATÓRNYCH SKÚŠOK

DETERMINATION OF SHEAR AND DEFORMATION PARAMETERS OF COARSE-GRAINED SOILS USING FIELD AND LABORATORY TESTS

Eliška Kučová, Juraj Slavkov[1]

[1]*Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: eliska.kucova@stuba.sk, juraj.slavkov@stuba.sk*

Abstrakt: Vlastnosti zemín a hornín sú dôležitou súčasťou návrhu geotechnických konštrukcií. Ich stanovenie je však vo veľkej miere ovplyvnené priestorovou variabilitou. Navyše, je v mnohých prípadoch komplikované odobrať neporušenú vzorku pre účely laboratórnych skúšok. V prípade hrubozrnných zemín sa pevnostné parametre zvyknú skúmať priamo v teréne, pretože klasické šmykové a oedometrické laboratórne skúšky neumožňujú skúšanie týchto zemín. Na Slovensku sa pre účely terénneho skúmania zemín často využíva aj dynamická penetrácia. Skúška je primárne určená na skúšanie odporu hrubozrnných zemín. Pomocou vhodných korelácií je možné z výsledkov skúšky odvodiť ich vybrané fyzikálne a mechanické vlastnosti. V laboratóriu je možné tieto vlastnosti skúmať pomocou veľkorozmerových oedometrických a šmykových skúšok. V tomto článku analyzujeme výsledky deformačného modulu a uhla šmykovej pevnosti odvodeného z výsledkov terénnych a laboratórnych skúšok.

Abstract: Soil properties are an integral part for the design of geotechnical structures. But their determination is highly affected by its spatial variability. Furthermore, in many cases it is impossible to extract undisturbed soil sample for laboratory testing. Regarding coarse-grained soils, their mechanical parameters are mostly determined directly in situ as conventional shear and oedometric apparatus don´t have the capacity for its measurement. In Slovakia, the dynamic penetration test is one of the most applied field tests used for these purposes. The test is primarily used for testing the resistance of coarse-grained soils but using proper correlations it is possible to determine other selected properties including deformation modulus and angle of shear strength. These parameters can be also tested in laboratory with large-scale shear box and oedometric apparatus. This article presents the analysis of the results of deformation modulus and angle of shear strength measured in situ and in laboratory.

Kľúčové slová: štrky, deformačné a šmykové parametre, dynamická penetrácia, veľkorozmerová oedometrická a krabicová šmyková skúška.

Key words: gravels, shear and deformation parameters, dynamic penetration test, large-scale oedometric test, shear box test.

1. Úvod

Stanovenie vlastností zemín a hornín predstavuje kľúčovú rolu pri návrhu geotechnických konštrukcií. Ich stanovenie je ale vo veľkej miere ovplyvnené priestorovou variabilitou (Pohl, 2011), a preto je v mnohých prípadoch zložité odobrať reprezentatívnu

a neporušenú vzorku vhodnú na ďalšie laboratórne skúšanie. U hrubozrnných zemín je laboratórne skúšanie pevnostných parametrov o to komplikovanejšie, že štandardné šmykové a oedometrické prístroje sú obmedzené veľkosťou častíc a neumožňujú vo väčšine prípadov ich skúšanie. Z tohto dôvodu sa mnohé skúšky zemín a hornín realizujú priamo v teréne.

Na Slovensku sa na skúšanie hrubozrnných zemín často využíva aj dynamická penetrácia (DP). Ide o pomerne jednoduchú terénnu skúšku, ktorou sa skúma odpor zemín voči dynamickej penetrácii tyče. DP skúška je štandardizovaná v normách (EN 1997-2:2007, EN ISO 22476-2) a je primárne určená pre skúšanie hrubozrnných zemín. Použitím vhodných korelácií je možné z výsledkov DP odvodiť vybrané geotechnické parametre vrátane uhla šmykovej pevnosti (ϕ_{eff}) a deformačného modulu (E_{def}). Pre odvodenie týchto vlastností sa na Slovensku používajú korelácie z viacerých zahraničných noriem (EN 1997-2:2007, DIN 4094-3:2002) a domácej literatúry (STN 72 1032:1997, Matys a kol., 1990).

V normách [6,7] sú korelácie odvodené z výsledkov počtu úderov N (merané pre 10 alebo 20 cm hĺbky zarazenia), prostredníctvom ktorých sa stanovuje relatívna uľahnutosť (I_D). Na základe I_D je následne možné stanoviť ďalšie parametre hrubozrnných zemín. Použiteľnosť týchto korelácií zhodnotili Vrettos, Papamichael (2018), ktorí tvrdia, že korelácie sú spoľahlivé na stanovenie strednej uľahnutosti, ale stanovenie ďalších parametrov na základe týchto korelácií neodporúčajú. Namiesto toho navrhujú použiť priame korelácie. Tieto sú publikované v slovenskej literatúre (STN 72 1032:1997, Matys a kol., 1990) a sú odvodené z výsledkov dynamického penetračného odporu (q_{dyn}). Tieto výsledky zohľadňujú trenie na tyči a zmenu hmotnosti tyče s narastajúcou hĺbkou, preto sú tieto výsledky považované za výpovednejšie (Matys a kol., 1990).

V laboratóriu je možné skúšať pevnostné parametre hrubozrnných zemín len pomocou veľkorozmerových šmykových a oedometrických skúšok, ktoré umožňujú skúšať aj zeminy s väčšími zrnami. Avšak v laboratórnych podmienkach je obtiažne dosiahnuť pôvodnú uľahnutosť zeminy, ktorá má vplyv na vyhodnotenie pevnostných parametrov. Preto sa vo väčšine prípadov pristupuje k terénnemu skúšaniu. Na druhej strane, počas realizácie penetračných skúšok hrubozrnnej zeminy môže dochádzať k jej roztláčaniu do strán, v dôsledku čoho sa získajú nižšie hodnoty uhla šmykovej pevnosti (Turček a kol., 2017).

Ďalšou komplikáciou pri terénnych skúškach je, že na vyhodnotenie parametra má výrazný vplyv zvolený korelačný vzťah. Pre dynamickú penetráciu existujú mnohé korelácie, ale nie všetky zohľadňujú genézu a zloženie zeminy. Cieľom tohto článku je preto analyzovať a porovnať výsledky pevnostných parametrov riečneho štrku nameraných pomocou dynamickej penetrácie a veľkorozmerových oedometrických a šmykových skúšok.

2. Metodika

2.1 Dynamické penetračné skúšky

Prostredníctvom série skúšok ťažkou dynamickou penetráciou (DPH) bolo skúmané podložie v oblasti blízko Bratislavy, ktorá spadá do územia Podunajskej nížiny a povodia rieky Dunaj. V skúšanej lokalite prevládajú hrubozrnné zeminy, najčastejšie zeminy triedy G1/GW a G2/GP, ktoré boli v minulosti naakumulované riekou Dunaj vo forme riečnych terás. Hrúbka vrstiev hrubozrnných zemín sa pohybujú v rozmedzí od 3 – 13 metrov. Zrná štrkovitých zemín sú dobre zaoblené, hladkého guľatého/ valcovitého tvaru a veľkosťou 1 – 5 cm.

Skúšky dynamickej penetrácie boli realizované do hĺbok 7 – 25 metrov. Dynamické penetrácie boli doplnené prieskumnými vrtmi pre účely klasifikačných skúšok. Hladina podzemnej vody sa pohybuje v hĺbkach 0,4 – 4 metre pod terénom. Z prieskumu vyplýva, že sú v skúmanej lokalite najviac zastúpené stredne uľahnuté až uľahnuté zle zrnené štrky

(G2/GP). Tieto zeminy sa striedajú s polohami štrkov s prímesou jemnozrnných zemín (G4/GM, G5/GC a miestami s vrstvami pieskovitých zemín (S3/S-F, S4/SM).

Výstupom DPH skúšok sú zaznamenané počty úderov N_{10} (-), ktoré sú potrebné na zarazenie tyče o 10 cm. Z výsledkov N_{10} možno odvodiť špecifický dynamický penetračný odpor q_{dyn} (MPa). Pri vyhodnocovaní odporu sú zohľadnené vplyvy podzemnej vody a trenia na plášti podľa zaužívaných postupov (EN ISO 22476-2). Z výsledkov N_{10}, q_{dyn} možno pomocou vybraných korelácií odvodiť vybrané geotechnické vlastnosti hrubozrnných zemín.

V tomto článku sa zameriavame na vyhodnotenie pevnostných parametrov – deformačný modul (E_{def}) a uhol šmykovej pevnosti (ϕ_{eff}) pomocou vybraných korelácií (tab. 1) uvedených v slovenskej literatúre (Matys a kol., 1990).

Použité korelácie berú do úvahy typ a triedu hrubozrnných zemín, ale nezohľadňujú genézu (t.j. tvar zŕn) zemín, ktorá má tiež vplyv na vyhodnotenie geotechnických parametrov.

Tab. 1 Korelácie pre vyhodnotenie pevnostných parametrov hrubozrnných zemín
Tab. 1 Correlations for determination of strength parameters of coarse-grained soils

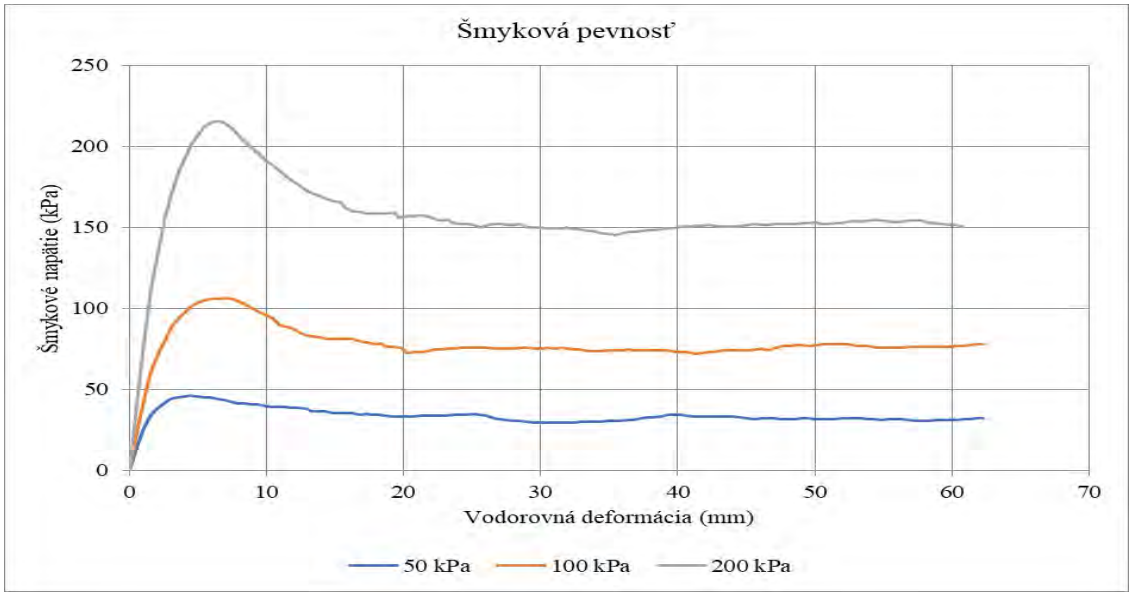
Zdroj	Parametre zemín	Korelácia	Zemina	Koeficienty	
Švasta	**Uhol šmykovej pevnosti**	$\varphi_{ef} = p \times (q_{dyn})^r$ [-]	Jemnozrnný piesok, štrkovité zeminy	***p***	24
				r	0.16
Švasta	**Deformačný modul (E_{def})**	$E_{def} = n \times (q_{dyn})^m$ [MPa]	Prachovitý piesok	***n***	2.0
				m	0.83
			Jemnozrnný piesok	***n***	3.5
				m	0.83
			Stredne zrnený, hrubozrnný štrk	***n***	5.5
				m	0.83
			Štrkovitý piesok	***n***	8.8
				m	0.83
Obert		$E_{def} = n \times q_{dyn}$ [MPa]	Prachovitý, ílovitý piesok	***n***	2
			Pieskovité zeminy		3
			Štrkovité zeminy		10

2.2 Šmykové a oedometrické skúšky

V laboratóriu boli skúmané pevnostné parametre zle zrneného štrku pomocou veľkorozmerových skúšok. Šmykové parametre boli skúšané na dvoch krabicových šmykoch. Prvým prístrojom bol veľkorozmerový šmyk SHEARMATIC 300. Šmyková krabica tohto prístroja má rozmery 300 x 300 x 200 mm. Na tomto šmykovom prístroji boli realizované 2 série skúšok pre normálové napätia 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa. Pri prvej sérií skúšok bola použitá normálová rýchlosť vodorovného posunu 1 mm/min. Pri druhej sérii skúšok bola použitá normálová rýchlosť 0,25 mm/min. Celková dĺžka vodorovného posunu bola 60 mm.

Druhá séria skúšok bola zrealizovaná na veľkorozmerovom krabicovom šmyku WILLE GEOTECHNICS ADS-500 s rozmermi šmykovej krabice 500 x 500 x 200 mm. Pomocou tohto prístroja sa zrealizovala 1 séria skúšok pri normálových napätiach 50 kPa, 150 kPa a 250 kPa. Normálová rýchlosť vodorovného posunu bola nastavená na 0,04 mm/min. Celková dĺžka vodorovného posunu bola 100 mm.

Pre všetky vzorky bol stanovený index relatívnej uľahnutosti, ktorý priamo vplýva na šmykovú pevnosť vzorky. Suchá, kyprá vzorka hrubozrnného materiálu, v rovine porušenia, priamo úmerne narastá s normálovým napätím. Uľahnutá vzorka, v závislosti od miery zhutnenia, vykazuje vyššiu šmykovú pevnosť a prejavuje sa efekt počiatočnej šmykovej pevnosti v dôsledku zaklinenia zŕn. Počiatočná pevnosť býva zvyčajne nízka a pre praktické úlohy ju možno zanedbať. Príklad vyhodnotenia šmykovej pevnosti a pracovný diagram skúšky je znázornený na obr. 1.



Obr. 1 Príklad pracovného diagramu šmykovej pevnosti
Fig.1 Example of working diagram of shear strength

Oedometrické skúšky stlačiteľnosti štrku boli neštandardne zrealizované pomocou triaxiálneho prístroja WILLE GEOTECHNICS, do ktorého bola namiesto triaxiálnej komory vložená forma pre Proctorovu skúšku s priemerom 150 mm a výškou 125 mm (obr. 2). Takáto simulácia oedometrickej skúšky nám umožnila testovať zeminu s maximálnym priemerom zŕn 16 mm. Vzorka bola preto v rámci prípravy presitovaná a zbavená častíc nad 16 mm. Skúšobná vzorka bola následne podrobená sérii oedometrických skúšok. Skúšky prebiehali na kyprej a uľahnutej zemine. Pri skúške s kyprou vzorkou bola zemina voľne nasypaná do Proctorovej formy. Potom bola zemina vložená do triaxiálneho prístroja, v ktorom boli simulované rôzne zaťažovacie stupne v dvoch cykloch. Kyprá vzorka bola podrobená dvom zaťažovacím skúškam s maximálnymi zaťažovacími stupňom 0,4 a 0,8 MPa.

Obr. 2 Veľkorozmerová oedometrická skúška
Fig. 2 Large-scale oedometric test

Rovnakým spôsobom bol skúšaná uľahnutá vzorka s maximálnym stupňom zaťaženia 0,6 MPa. Na dosiahnutie uľahnutosti bola pred začatím testu vzorka zeminy zhutnená v troch vrstvách podľa pravidiel pre skúšku Proctor test (STN 72 1015).

3. Výsledky a diskusia

Ťažkou dynamickou penetráciou boli testované hrubozrnné zeminy v oblasti rieky Dunaj na území Bratislavy. Z prieskumu bolo zistené, že v oblasti sú najviac zastúpené štrky triedy G1/GW a G2/GP. Pomocou vybraných korelácií (tab. 1) boli odvodené pevnostné parametre zle zrnených štrkov (tab. 2), ktoré boli ďalej skúšané aj v laboratóriu.

Z výsledkov q_{dyn} ťažkej dynamickej penetrácie bol uhol šmykovej pevnosti odvodený iba podľa Švastovej korelácie, pričom deformačný modul bol odvodený pomocou dvoch korelácií (Švasta, Obert). Z výsledkov v tab. 2 vidieť, že deformačný modul stanovený pomocou Obertovej korelácie má vyššie hodnoty.

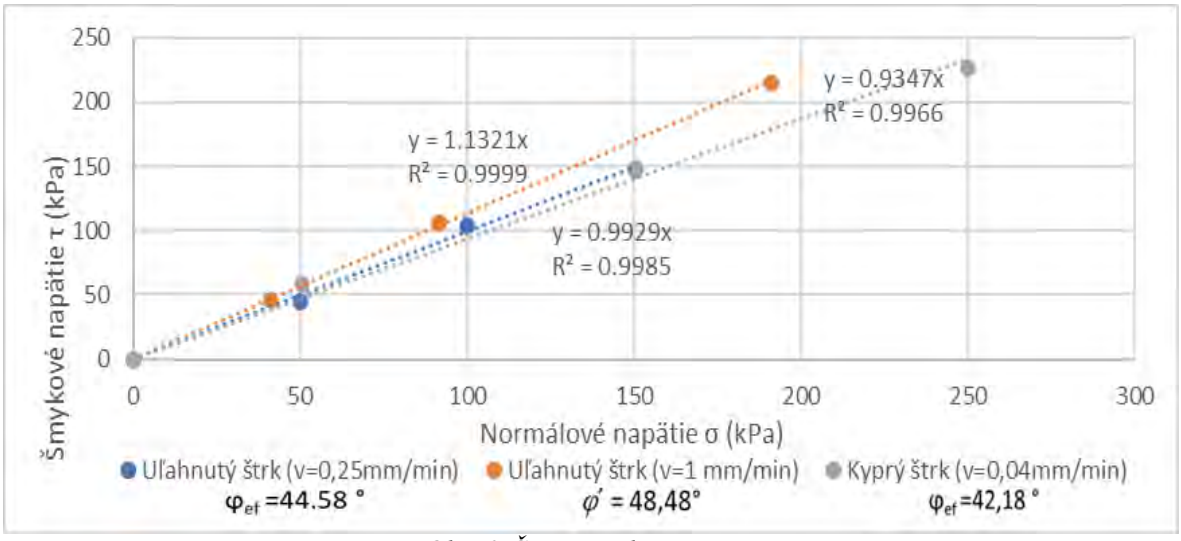
Tab. 2 Výsledky pevnostných parametrov odvodených z výsledkov DPH
Tab. 2 Results of strength parameters derived from results of DPH

Relatívna uľahnutosť zle zrnených štrkov					
stredne uľahnuté			uľahnuté		
ϕ_{eff}	E_{def} [1]	E_{def} [2]	ϕ_{eff}	E_{def} [3]	E_{def} [4]
[°]	[MPa]	[MPa]	**[°]**	[MPa]	[MPa]
38.5	**75.57**	**133.42**	36.5	**103.77**	**196.08**

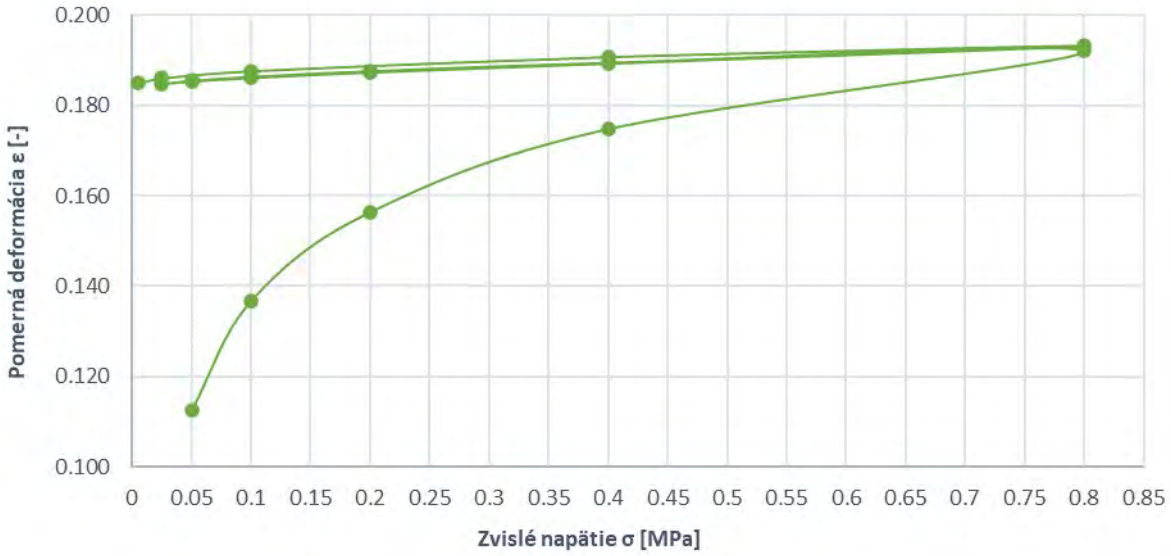
Poznámka:
E_{def} [1], E_{def} [3] – deformačný modul odvodený podľa Švastovej korelácie (tab. 1)
E_{def} [2], E_{def} [4] – deformačný modul odvodený podľa Obertovej korelácie (tab. 1)

V laboratóriu boli pevnostné parametre zle zrneného štrku skúšané pomocou veľkorozmerových šmykových a oedometrických skúšok. Realizovali sa 3 série šmykových skúšok s rôznym stupňom uľahnutosti skúšanej zeminy. Kyprý zle zrnený štrk bol skúšaný na veľkorozmerovom šmyku WILLE GEOTECHNICS ADS-500 (rozmery šmykovej krabice 500 x 500 mm) s normálovou rýchlosťou vodorovného posunu 0.04 mm/min. Ďalšie série šmykových skúšok boli realizované s uľahnutou zeminou na veľkorozmerovom šmyku SHEARMATIC 300 (rozmery šmykovej krabice 300 x 300 mm) s normálovými rýchlosťami vodorovného posunu 0.25 a 1 mm/min. Výsledkom šmykových skúšok bol diagram šmykovej pevnosti (obr. 1), ktorý znázorňuje priebeh šmykovej pevnosti voči vodorovnému posunu. V ďalšom kroku boli pre všetky skúšky zostrojené čiary šmykovej pevnosti (obr. 3), ktoré vznikli preložením vrcholových hodnôt šmykovej pevnosti všetkých stupňov normálového napätia (rozsah 0-250 kPa). Na obr. 3 sú pre jednotlivé čiary uvádzané aj koeficienty determinácie R^2, ktoré pri všetkých čiarach spĺňajú hodnoty požadované normou.

Ďalej sa v laboratóriu zrealizovali 3 skúšky stlačiteľnosti zle zrneného štrku pomocou veľkorozmerového oedometra (obr. 2). Tak ako pri šmyku, aj skúšky stlačiteľnosti boli realizované na kyprej a uľahnutej vzorke zeminy. Kyprý štrk bol počas skúšky postupne zaťažovaný normálovým napätím od 25 kPa do 400 kPa. Následne bola vzorka odťažená. Spolu bolo v jednom zaťažovacom cykle simulovaných 5 zaťažovacích a 2 odľahčovacie stupne s trvaním 1 hod. Počas druhej skúšky stlačiteľnosti bola kyprá zemina zaťažená maximálnym napätím 800 kPa. Jeden zaťažovací cyklus pozostával z 5 zaťažovacích a 5 odľahčovacích stupňov. Pred treťou skúškou bola vzorka zeminy zhutnená podľa princípov Proctorovej skúšky (STN 72 1015). Počas skúšky bol zhutnený štrk zaťažený maximálnym napätím 600 kPa. Príklad priebehu kompresnej krivky je znázornený na obr. 4. Na obr. 5 sú vykreslené výsledky skúšok stlačiteľnosti kyprého a uľahnutého zle zrneného štrku.



Obr. 3 Čiary šmykovej pevnosti
Fig. 3 Shear strength lines

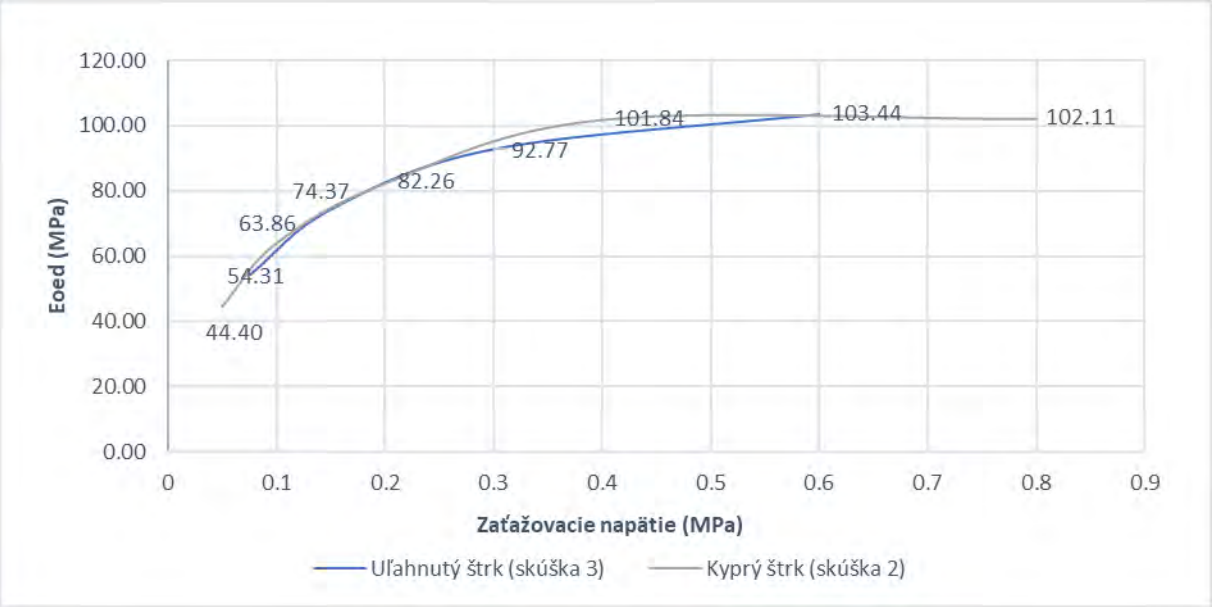


Obr. 4 Príklad priebehu kompresnej krivky
Fig. 4 Example of Compression Curve

Výsledky oedometrických a šmykových skúšok boli porovnané s výsledkami deformačného modulu odvodeného z DPH skúšok. Uhol šmykovej pevnosti odvodený z výsledkov DPH pomocou Švastovej korelácie dosahuje hodnoty 36° – 38°. V porovnaní s výsledkami veľkorozmerových šmykových skúšok (obr. 3) sú tieto hodnoty nižšie. Treba však podotknúť, že skúšaný štrk patrí medzi hrubozrnné zeminy fluviálneho pôvodu s oblým tvarom zŕn, ktoré majú menšiu tendenciu zakliesniť do seba. Preto sa dajú menšie hodnoty uhla šmykovej pevnosti namerané v teréne vysvetliť už spomenutým roztláčaním zeminy do strán počas dynamickej penetrácie.

Deformačné moduly kyprých štrkov (obr. 5) z prvej skúšky stlačiteľnosti sa pohybovali v rozmedzí 61 – 73 MPa. Tieto hodnoty boli výrazne nižšie ako minimálne/ maximálne hodnoty deformačného modulu odvodeného z výsledkov DPH, a preto boli z porovnania vylúčené. Deformačné moduly z druhej a tretej oedometrickej skúšky (obr. 5) vykazujú lepšiu zhodu s výsledkami deformačných modulov stredne uľahnutých a uľahnutých štrkov z tab. 2 odvodených podľa Švastu. Výsledky deformačného modulu, odvodené pomocou Obertovej

korelácie (tab. 2), sú zreteľne väčšie ako výsledky namerané počas skúšok stlačiteľnosti. Z porovnania vyplýva, že na odvodenie deformačného modulu z výsledkov dynamickej penetrácie je vhodnejšia Švastova korelácia (tab. 1), ktorá je kritickejšia a udáva nižšie hodnoty deformačného modulu.



Obr. 5 Výsledky oedometrického deformačného modulu
Fig. 5 Results of Oedometric Deformation Modulus

Zvolené korelácie pre odvodenie ϕ_{eff} a E_{def} (tab. 1) nezohľadňuje genézu zeminy, preto nevieme isto určiť presnosť výsledkov. Na druhej strane, pri laboratórnych skúškach je potrebné poznať pôvodnú uľahnutosť zeminy, ktorá značne ovplyvňuje stanovenie pevnostných parametrov. Keďže je pre hrubozrnné zeminy zložitejšie dosiahnuť pôvodnú uľahnutosť, možno laboratórnymi skúškami namerať odlišné výsledky.

V súčasnosti je dynamická penetrácia pomerne často využívaná pre prieskum zemín a preto je vhodné, aj za pomoci laboratórnych skúšok, prehodnotiť a upresniť využitie existujúcich korelácií s ohľadom na genézu zemín, keďže mnohé z uvedených korelácií ju vôbec neberú do úvahy.

4. Záver

Stanovenie vlastností zemín a hornín predstavuje kľúčovú rolu pri návrhu geotechnických konštrukcií. Ich stanovenie je ale vo veľkej miere ovplyvnené priestorovou variabilitou (Pohl, 2011), a preto je v mnohých prípadoch zložité odobrať reprezentatívnu a neporušenú vzorku vhodnú na ďalšie laboratórne skúšanie. Z tohto dôvodu sa mnohé skúšky realizujú priamo v teréne. Často sú využívané rôzne penetračné skúšky (Schneid, 2009). Na Slovensku je dynamická penetrácia (DP) jednou z najpoužívanejších terénnych skúšok pre prieskum hrubozrnných zemín. Použitím vhodných korelácií, uvedených v zahraničnej aj v slovenskej literatúre, je možné z výsledkov DP odvodiť vybrané geotechnické parametre vrátane pevnostných parametrov – uhla šmykovej pevnosti (ϕ_{ef}) a deformačného modulu (E_{def}). V laboratóriu sa tieto parametre dajú stanoviť len pomocou veľkorozmerových oedometrických a šmykových skúšok, keďže štandardné skúšky umožňujú skúšať zeminy s menšou frakciou zŕn (Pavlík, Račanský, 2019). Ale, v laboratórnych podmienkach je

obtiažne dosiahnuť pôvodnú uľahnutosť zeminy, ktorá má vplyv na vyhodnotenie pevnostných parametrov. Preto sa vo väčšine prípadov pristupuje k terénnemu skúšaniu.

V článku sa zameriavame na porovnanie výsledkov pevnostných parametrov riečneho štrku nameraných pomocou ťažkej dynamickej penetrácie a veľkorozmerových oedometrických a šmykových skúšok. Ťažkou dynamickou penetráciou boli testované hrubozrnné zeminy v oblasti rieky Dunaj blízko Bratislavy. Pomocou vybraných korelácií (Švasta, Obert) boli odvodené pevnostné parametre zle zrnených štrkov, ktoré boli ďalej skúšané aj v laboratóriu pomocou veľkorozmerovej oedometrickej a šmykovej skúšky.

Realizovali sa 3 série šmykových skúšok s kyprým a uľahnutým štrkom. Na skúšky boli použité dva veľkorozmerové šmykové prístroje – WILLE GEOTECHNICS ADS-500 (rozmery šmykovej krabice 500 x 500 x 200 mm) a SHEARMATIC 300 (rozmery šmykovej krabice 300 x 300 x 200 mm). Pre skúšky boli nastavené 3 normálové rýchlosti vodorovného posunu – 0.04, 0.25 a 1 mm/min. Uhol šmykovej pevnosti odvodený z výsledkov DPH pomocou Švastovej korelácie dosahuje hodnoty 36° – 38°. V porovnaní s výsledkami veľkorozmerových šmykových skúšok, sú tieto hodnoty nižšie. Vzhľadom na to, že sa jedná o fluviálne štrky s oblým tvarom zŕn, sa dajú menšie hodnoty uhla šmykovej pevnosti vysvetliť už roztláčaním zeminy do strán počas dynamickej penetrácie.

Ďalej sa v laboratóriu zrealizovali 3 skúšky stlačiteľnosti zle zrneného kyprého a uľahnutého štrku pomocou veľkorozmerového oedometra, ktorý bol zostrojený kombináciou triaxiálneho prístroja a Proctorovej valcovej formy s priemerom 150 mm a výškou 125 mm. Vzorky zeminy boli podrobené dvom zaťažovacím cyklom s maximálnym normálovým napätím 400, 600, 800 kPa. Deformačné moduly kyprých štrkov z prvej skúšky stlačiteľnosti vykazovali výrazne nižšie hodnoty v porovnaní s hodnotami deformačného modulu odvodeného z výsledkov DPH, a preto boli z porovnania vylúčené. Deformačné moduly z druhej a tretej oedometrickej skúšky vykazujú lepšiu zhodu s výsledkami deformačných modulov stredne uľahnutých a uľahnutých štrkov odvodených podľa Švastu. Ale, zvolené korelácie pre odvodenie ϕ_{eff} a E_{def} nezohľadňuje genézu zeminy, preto nevieme isto určiť presnosť výsledkov.

Na druhej strane je na Slovensku dynamická penetrácia relatívne často využívaná pre prieskum zemín. Preto je vhodné, aj za pomoci laboratórnych skúšok, prehodnotiť a upresniť využitie existujúcich korelácií s ohľadom na genézu zemín, keďže mnohé z uvedených korelácií ju vôbec neberú do úvahy.

Poďakovanie

Príspevok vznikol vďaka podpore projektu VEGA 1/0745/21 výskumnej agentúry Ministerstva školstva, výskumu a športu SR a SAV.

Zoznam literatúry

DIN 4094-3:2002: Subsoil. Field testing. Part – 3: Dynamic probing.

EN 1997-2:2007: Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing.

EN ISO 22476-2: *Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 2: Dynamic Probing*

Matys, M., Ťavoda, O., Cuninka, M., 1990: *Poľné skúšky zemín*, Alfa, Bratislava, Slovakia, 1990

Pavlík, I., Račanský, V., 2019: *Metodika vyhodnocení laboratórních smykových a edometrických zkoušek štěrků a jiných hrubozrnných materliálů*. In *Zakládání staveb – Brno 2019 : 47. konference se zahraniční účastí. Sborník příspevků. Brno, ČR, 11. – 12. 11. 2019* = Foundation engineering – Brno 2019, 47th Conference with international participation. Proceedings. 1. vyd. Praha : Česká geotechnická společnost ČSSI, 2019, s. 43-50. ISBN 978-80-87920-07-7.

Pohl, C., 2011: *Determination of characteristic soil values by statistical methods*. In: Vogt, Norbert; Schuppener, Bernd; Straub, Daniel; Bräu, Gerhardt (Hg.): Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. s. 427-434

Schnaid, F., 2009: *In Situ Testing in Geomechanics, The main tests*. London, New York: Taylor & Francis. 2009. 328 s. ISBN 0-203-93133-5

STN 72 1015*: Laboratórne stanovenie zhutniteľnosti zemín*

STN 72 1032:1997: Dynamická penetračná skúška

Turček, P., Súľovská, M., Stacho, J., Ondrášik, M., Frankovská, J., Kopecký, M., Brček, M., Panuška J., 2017: *Experimentálny výskum pevnostných a deformačných vlastností štrkových pilierov*. Záverečná správa výskumnej úlohy. Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, 2017, 45 s.

Vrettos, C., Papamichael, S., 2018: *Relative density of cohesionless soils from dynamic probe and cone penetration test – An update assessment of empirical relationship*. Geotechnik 41 (2018), s. 186-196

INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM PRE NÁVRH ENERGETICKÝCH GEOKONŠTRUKCIÍ

ENGINEERING GEOLOGICAL SURVEY FOR DESIGN OF ENERGY GEOSTRUCTURES

Juraj Slavkov[1]

[1]*Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: juraj.slavkov@stuba.sk*

Abstrakt: V súčasnosti vzniká globálny tlak na dosiahnutie uhlíkovej neutrality, s čím sa snaží vysporiadať aj stavebníctvo, ktoré prináša obnoviteľné a udržateľné technológie. Medzi takéto technológie patria aj energetické geokonštrukcie.

Kľúčom k funkčnému a efektívnemu návrhu a činnosti energetických geokonštrukcií je správna interpretácia inžinierskogeologického prieskumu. Z toho vyplýva, že vlastnosti základovej pôdy nerozhodujú len o možnosti realizácie a teda vhodnosti záujmového územia, ale aj o spôsobe a možnosti získavania a ukladania energie. Tento článok sa zaoberá stanovením parametrov podložia, ktoré sú nevyhnutné pre návrh energetických geokonštrukcií.

Abstract: Currently, there is global pressure to achieve carbon neutrality, which is also what the construction industry is trying to deal with, bringing renewable and sustainable technologies. Such technologies also include energy geostructures.

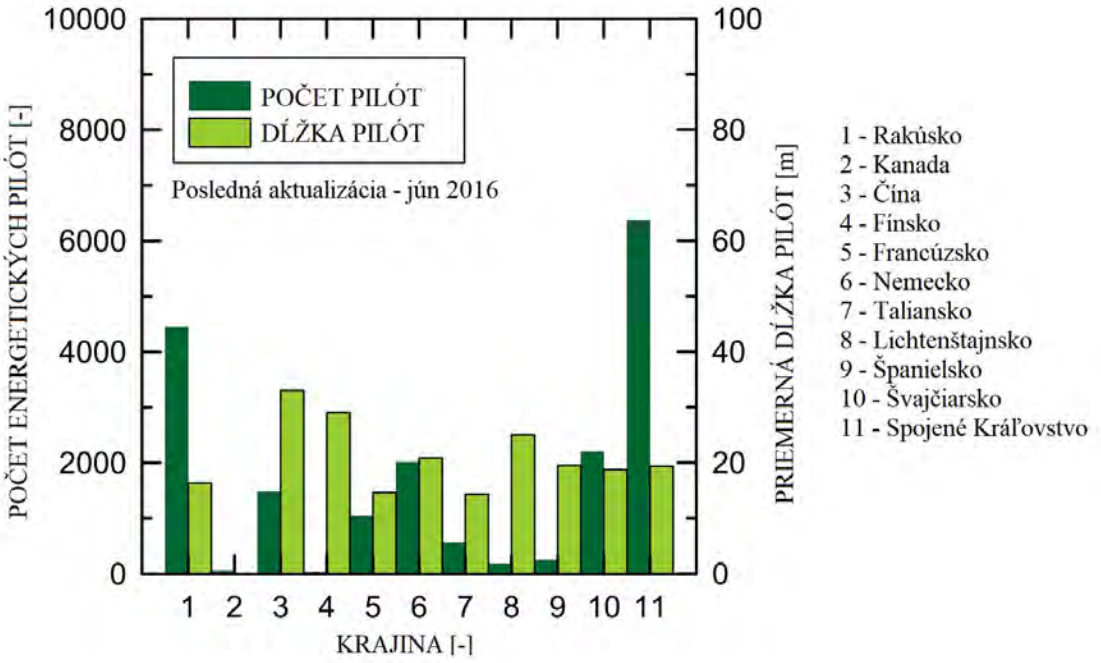
The key to the functional and efficient design and operation of energy geostructures is the correct interpretation of the ground investigation. It follows that the properties of the foundation soil do not determine just the possibility of implementation and thus the suitability of the area of interest, but also the method and possibility of obtaining and storing energy. This article deals with the determination of ground parameters that are necessary for the design of energy geostructures.

Kľúčové slová: inžinierskogeologický prieskum, energetické geokonštrukcie, geotermálna energia, tepelná vodivosť

Key words: ground investigation, energy geostructures, geothermal energy, thermal conductivity

1. Úvod do energetických geokonštrukcií

Energetické geokonštrukcie patria v krajinách západnej Európy a severnej Ameriky medzi technológie, kde k ich aplikáciám dochádza pomerne často (obr. 1). V Slovenskej republike však táto technológia nebola dosiaľ použitá. Energetické geokonštrukcie sú nosné konštrukcie, ktorých primárnym účelom je prenos zaťaženia z hornej stavby do podložia. Sekundárny účel týchto geokonštrukcií je využitie potenciálu geotermálnej energie a teda fungujú ako geotermálne výmenníky tepla. Sú vhodné na vykurovanie a chladenie hornej stavby, ohrev vody, rozmrazovanie, ale aj ako podzemné úložisko termálnej energie. Štandardne tieto energetické geokonštrukcie pozostávajú z výstuže, výplňového materiálu (betónu), rozvodných potrubí a ich príslušných armatúr.



Obr. 1 Početnosť a dĺžka realizovaných energetických pilót v zahraničí (Laloui a Rotta Loria, 2017)
Fig. 1 Number and length of implemented energy piles abroad (Laloui and Rotta Loria, 2017)

2. Energetické vstupy pre návrh energetických geokonštrukcií

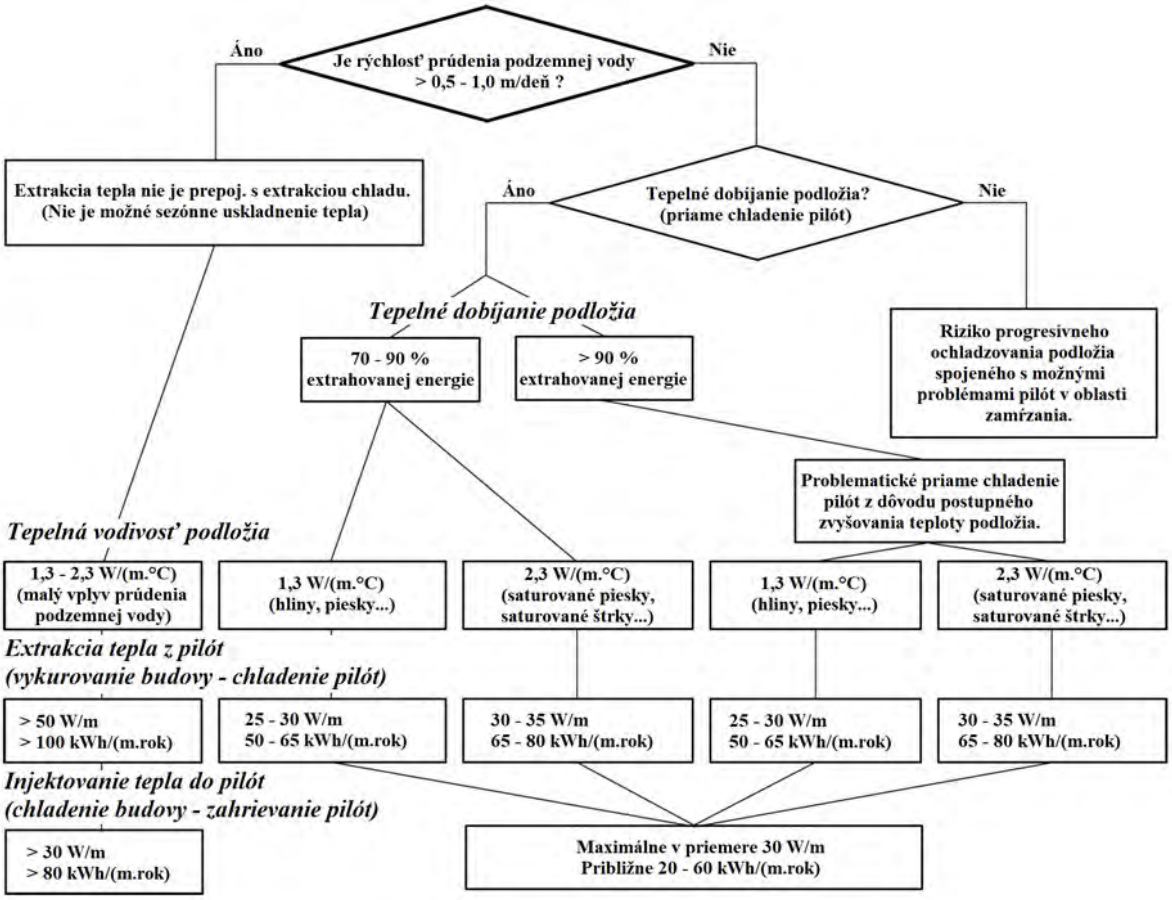
Predpokladom k správnemu návrhu energetických geokonštrukcií je poznanie energetického potenciálu krajiny. Vstupné parametre na určenie výkonu energetických geokonštrukcií popisujú vlastnosti geologického podložia z hľadiska energetickej využiteľnosti a teda väčšieho alebo menšieho energetického potenciálu záujmového územia. Ako je uvedené na obr. 2 a ako už bolo spomenuté, rôzne hodnoty energetických vstupov nerozhodujú o možnosti realizácie a teda vhodnosti záujmového územia, ale o spôsobe a možnosti získavania a ukladania energie.

2.1 Prirodzená teplota podložia

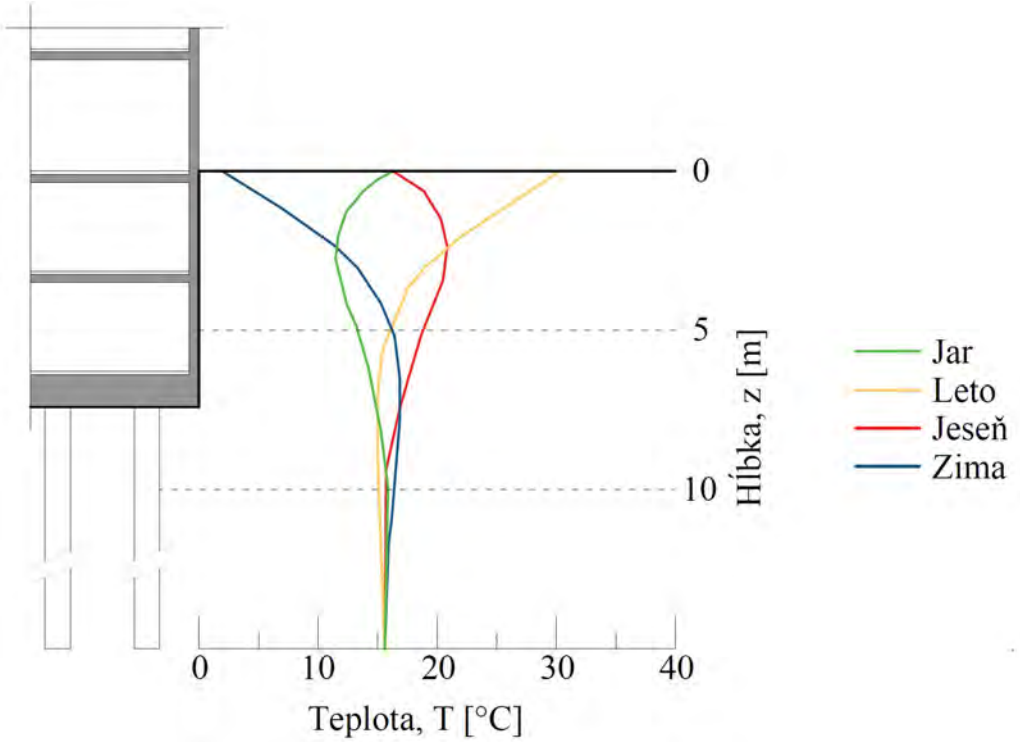
Prirodzená teplota podložia (T_0) [°C] sa stanovuje in situ pozdĺž vrtu s použitím rôznych systémov merania teploty, ako sú termočlánky, káblové snímače teploty, ponorné bezdrôtové sondy, optické vlákna. Môže sa určiť aj na základe lokálnych skúseností s pomocou matematických vzťahov, kde je prirodzená teplota podložia funkciou teploty v čase a hĺbky. Vyššia hodnota pôsobí priaznivo na návrh energetických pilót, pretože znižuje riziko spojeného s progresívnym ochladzovaním podložia a tým zjednodušuje optimalizáciu celého geotermálneho systému (*SIA D 0190 2005*).

Hodnota prirodzenej teploty podložia sa mení s hĺbkou, kedy s narastajúcou hĺbkou stúpa a zároveň sa mení aj v závislosti od ročných období. Na základe obr. 3, ktorý vychádza z viacerých meraní, v našom podnebnom pásme predpokladáme, že najväčšie zmeny teploty v podloží vznikajú do prvých 6 až 8 m pod úrovňou upraveného terénu.

Štandardne pri energetických pilótach, ktoré patria do skupiny energetických geokonštrukcií, predpokladáme budovy s minimálne jedným podzemným podlažím. Na základe tohto predpokladu je možné podľa obr. 3 uvažovať, že prirodzená teplota podložia bude v priebehu roka konštantná, resp., že jej hodnota sa bude meniť iba minimálne v závislosti od ročných období. Počas prevádzky systémov energetických geokonštrukcií sa teplota horninového prostredia zvyčajne pohybuje v rozmedzí od 5 °C do 40 °C.



Obr. 2 Vplyv vstupných parametrov na návrh (SIA D 0190 2005)
Fig. 2 Influence of input parameters on the design (SIA D 0190 2005)



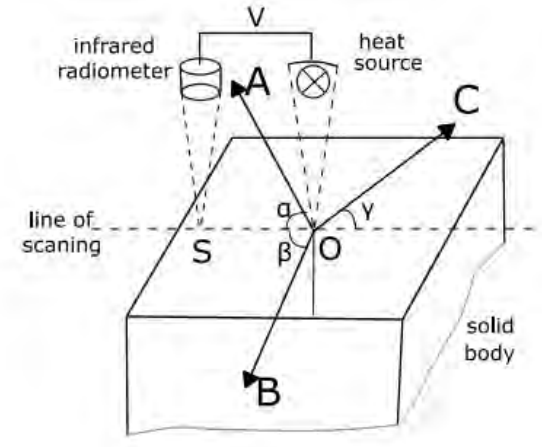
Obr. 3 Graf zmeny teploty v podloží v závislosti od hĺbky a ročných období
Fig. 3 Graph of temperature change in the subsoil depending on the depth and seasons

2.2 Rýchlosť prúdenia podzemnej vody

Pre návrh geotermálnych systémov je dôležité stanoviť rýchlosť prúdenia podzemnej vody (v_W) [m/deň], ktorá je definovaná ako pohyb vody v podloží (*Durmeková a kol., 2003*). Tento parameter podložia je veľmi dôležitý pre návrh geotermálnych systémov, ktoré sú súčasťou energetických geokonštrukcií. Ak je rýchlosť prúdenia podzemnej vody (v_W) v intervale 0,5-1,0 [m/deň] je možné sezónne uskladniť teplo v podloží. V opačnom prípade hovoríme o nadlimitnej hodnote, ktorá sezónne uskladnenie tepla neumožňuje (*SIA D 0190 2005*).

2.3 Tepelná vodivosť

Medzi významné charakteristiky podložia, potrebné pre návrh energetických geokonštrukcií, patrí tepelná vodivosť podložia (λ_{Soil}) [W/(m.K)]. Definujeme ju ako atribút udávajúci množstvo tepla kolmo prepúšťaného meranou plochou v danom teplotnom gradiente, teda schopnosť uskutočňovať vedenie tepla (*Durmeková a kol., 2013*). Je to kľúčový parameter, ktorý charakterizuje geotermálny potenciál podložia (*Laloui a Rotta Loria, 2020*). Závisí od mineralogického zloženia, objemovej hmotnosti v suchom stave, vlhkosti a zrnitosti. Tepelnú vodivosť podložia stanovujeme v teréne alebo v laboratóriu pomocou špeciálnych meracích prístrojov. Prehľadné zobrazenie metód na určenie tepelnej vodivosti so špecifikáciou je uvedené v tab. 1. Na meranie tepelnej vodivosti skalných hornín a zemín v laboratóriu sa používa metóda delenej tyče alebo metóda ihlovej sondy. Táto metóda je vhodná aj na stanovenie súčiniteľa teplotnej vodivosti (α_d) [m^2/s]. Metóda optického skenovania (OS) je relatívne nová metóda aj pre oblasť tepelnej fyziky. Teoretický model je založený na skenovaní povrchu vzorky pomocou mobilného a nepretržite prevádzkovaného zdroja konštantného tepla v kombinácii s teplotným senzorom. Je to bezkontaktná metóda. Princíp metódy je znázornený na obr. 4. V teréne je najčastejšie používanou metódou na stanovenie tepelnej vodivosti zemín a skalných hornín metóda stanovenia geotermálnej odozvy vo vrte (TRT). DTRT skúška umožňuje meranie pozdĺž výmenníka tepla vo vrte pomocou káblov z optických vlákien (*Vieira a kol., 2017*). Na rozdiel od TRT skúšky umožňuje merať tepelnú vodivosť v jednotlivých vrstvách (sekciách) hornín.



Obr. 4 Princíp metódy optického skenovania (Popov a kol., 1999). V: rýchlosť skenovania; O: oblasť tepelného bodu; S: oblasť detekcie rádiometra; A, B, C: hlavné osi tepelnej vodivosti s uhlami α, β, γ resp. k čiare snímania

Fig. 4 Principle of optical scanning method (Popov et al., 1999). V: velocity of scanning; O: area of the heat spot; S: detection area of the radiometer; A, B, C: main axes of thermal conductivity with angles α, β, γ to the line of scanning, respectively

Tab. 1 Metódy stanovenia tepelnej vodivosti λ_{Soil}
Tab. 1 Methods for determination of thermal conductivity λ_{Soil}

Metóda	Vhodnosť pre		Špecifikácia metódy
	Zeminy	Skalné horniny	
Metóda viacerých sond	áno	áno	Terénna a laboratórna skúška
Metóda jednej sondy	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre jemnozrnné neporušené vzorky
Metóda delenej tyče		áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre hrubozrnné zeminy
Neustálené vedenie tepla (TPS)	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre skalné horniny, zvážiť použitie pre zeminy
Optická skenovacia metóda (OS)	áno		Skúška na vzorkách jadier z vrtov
Geotermálna odozva vo vrte (TRT)	áno	áno	Terénna skúška
Distribuovaná skúška termickej odozvy (DTRT)	áno	áno	Terénna skúška
Teoretický výpočet (empirické korelácie)	áno		Výpočet na základe minerálneho zloženia, pórovitosti a vlhkosti

3. Výsledky laboratórneho stanovenia tepelnej vodivosti prístrojom ISOMET 2114

V laboratóriu mechaniky zemín sme pre 6 vzoriek stanovili tepelnú vodivosť metódou povrchovej sondy, ktorú môžeme zaradiť ku metódam TPS.

Meranie sa uskutočnilo použitím prístroja ISOMET 2114 (obr. 5). ISOMET 2114 je prenosný systém na meranie vlastností prenosu tepla materiálov. Princíp merania zariadením je vo vysielaní impulzov tepelného toku do vzorky. Jedná sa o dynamickú metódu, ktorá výrazne skracuje trvanie merania v porovnaní s inými metódami merania. Teplotný rozsah zariadenia s povrchovou sondou je optimálne od -15 °C do 50 °C . Charakteristiky meracieho zariadenia ISOMET 2114 sú uvedené v tab. 2. Vzorky zemín a skalných hornín boli podrobené trom meraniam pri dodržaní rovnakej teploty a vlhkosti vzorky a okolitého prostredia. Výsledná hodnota v tab. 3 je priemerom týchto troch meraní.

Tab. 2 Charakteristiky prístroja ISOMET 2114
Tab. 2 Characteristics of ISOMET 2114 measurement apparatus.

Meraný parameter	Rozsah hodnôt	Presnosť merania
Tepelná vodivosť	0,015 až 0.70[W/(m.K)]	5 % čítania + 0.001W/(m.K)
	0,70 až 6,0 [W/(m.K)]	10 % čítania
Objemová tepelná kapacita	4×10^4–3×10^6 J/m^3 K	15 % čítania + 1×10^3 J/(m^3 K)
Teplota	– 20 do (+70) °C	±1 °C

Obr. 5 Prístroj ISOMET 2114 – vľavo príložná sonda, vpravo ihlová sonda
Fig. 5 ISOMET 2114 device – surface probe on the left, needle probe on the right

Tab. 3 Výsledky stanovenia tepelnej vodivosti λ_{Soil}
Tab. 3 Results of thermal conductivity λ_{Soil} laboratory determination

Druh horniny	**Tepelná vodivosť (merania) λ_{Soil} [W/(m.K)]**	**Tepelná vodivosť (Hoseinimighani, 2021) λ_{Soil} [W/(m.K)]**
Travertín	2,78	2,17
Piesok (suchý)	0,23	0,25
Piesok (mokrý)	1,37	1,2 - 2,6
Pieskovec	0,94	1,60 - 2,10
Kryštalická vyvretá hornina	2,25	1,70 - 4,00
F6 CI so strednou plasticitou	1,75	1,80
F6 CL s nízkou plasticitou	1,40	1,30 - 2,00

Výsledky potvrdili poznatky z odbornej literatúry, že hodnota tepelnej vodivosti v laboratórnych podmienkach závisí od vlhkosti vzorky (zeminy) (*Vieira a kol., 2017*). Ďalšou charakteristikou, ktorá má vplyv na tepelnú vodivosť je priepustnosť. Čím priepustnejšia je zemina, tým je hodnota tepelnej vodivosti vyššia. Potvrdili to napr. merania v 100 m hlbokom vrte v Chorvátsku (*Soldo a kol., 2015*).

Zvolená metóda merania tepelnej vodivosti je síce rýchla a cenovo dostupná, ale jej presnosť pri meraní je citlivá na zarovnanie povrchu vzorky, preto sa uprednostňuje najmä pre skalné horniny. Soldo a kol. použili metódu pomocou prístroja ISOMET 2114 na priame

meranie tepelnej vodivosti v teréne a porovnali ju s terénnou skúškou merania geotermálnej odozvy vo vrte (TRT) a skúškou DTRT vo vrte (*Soldo a kol., 2015*).

4. Záver

Na stanovenie tepelnej vodivosti v skalných horninách je možné vo všeobecnosti použiť akúkoľvek metódu, pri zeminách je výber metódy obmedzenejší (tab. 1). Zvolené metódy pre dané horninové prostredie ovplyvňujú presnosť a spoľahlivosť nameraných hodnôt. Laboratórne stanovenie tepelnej vodivosti vykazuje určité rozdiely oproti terénnym metódam. Na základe vlastných výsledkov a meraní a publikovaných údajov iných autorov (*Bouazza a kol., 2013, Vieira a kol., 2017*) sú v teréne namerané hodnoty tepelnej vodivosti o 10 až 20 % vyššie ako v laboratóriu. Meranie tepelnej vodivosti v laboratóriu je vhodné predovšetkým na získanie prehľadu o tom, v akých hodnotách je možné predpokladať tepelnú vodivosť. Výhodou laboratórnych metód je ich cena a rýchlosť. Nevýhodou je ich presnosť, pretože nezohľadňujú vplyv pohybu vody, klimatické zmeny a preto niektoré odobraté vzorky nemusia v laboratóriu reprezentovať jej skutočné uloženie (*Hoseinimighani, 2021*).

Vyššie hodnoty tepelnej vodivosti ovplyvňujú aj návrh energetických geokonštrukcií v zmysle efektívnejšieho návrhu tepelného čerpala, nakoľko sa so zvyšujúcou tepelnou vodivosťou podložia zlepšuje vedenie tepla a tým aj výkon energetického systému (*Frankovská, 2020*).

Na základe vyššie spomenutých záverov odporúčame pre správny a efektívny návrh energetických geokonštrukcií vykonať v rámci inžinierskogeologického prieskumu aj meranie tepelnej vodivosť in situ. Informácie o stanovení termických vlastností horninového prostredia sú zahrnuté v sérii noriem Európskej technickej komisie TC 341 pre CEN (*EN ISO 17628, 2014*) a v pripravovanej 2. časti Eurokódu 7 (*prEN 1997-2, 2022*).

Poďakovanie

Článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0745/21 vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV.

Zoznam literatúry

Bouazza, A., Wang, B., & Singh, R.M., 2013: Soil effective thermal conductivity from energy pile thermal tests. In: Manessero, M., Dominijanni, A., Forti, S. & Musso, G. (eds) *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics:* Proceedings of the International Symposium, Torino, Italy, 1–3 July 2013. Taylor & Francis, London, s. 211–219.

Durmeková, T., Wagner, P., Frankovská, J., 2013: Vlastnosti hornín a ich stanovenie v laboratóriu. 1. Skalné horniny, Univerzita Komenského v Bratislave, 173 s., ISBN 978-80-223-3330-6.

EN ISO 17628:2014. Geotechnical investigation and testing — Geothermal testing. Determination of thermal conductivity of soil and rock using borehole, 35 s.

Frankovská, J., 2020: Možnosti využitia horninového prostredia na energetické účely. In *Geotechnika 2020: sborník příspěvků 17. mezinárodní konference. Soláň, ČR, 17. - 18. 9. 2020*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta stavební. Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2020.

Hoseinimighani, H., Szendefy, J., 2021: Comparison of different methods for measuring thermal properties of soil: review on laboratory, in-situ and numerical modeling methods. *Energy*, *27*, 31.

Laloui, L., Rotta Loria, A. F., 2017: Energetické geokonstrukce: silná technologie pro vytváření prostředí s nízkým obsahem uhlíku*, In Geotechnika* 20, č. 1, 2017, s. 3-18.

Laloui, L., Rotta Loria, A. F., 2020: *Analysis and Design of Energy Geostructures,* Academic Press, 1096 ps., ISBN 978-0-12-820623-2.

prEN 1997-2 Geotechnical design - Ground properties (2022), 148 s.

Popov, Y.A., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F., Burkhardt, H., 1999: Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics* 1999, 28, s. 253–276

SIA D 0190 2005: *Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührenden Betonbauteilen - Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb*, SIA Zurich.

Soldo, V., Borović, S., Lepoša, L., Boban, L., 2016:. Comparison of different methods for ground thermal properties determination in a clastic sedimentary environment. *Geothermics*, 61, s. 1–11.

Vieira, A., Maranha, J., Christodoulides, P., Alberdi-Pagola, M., Loveridge, F., Nguyen, F., Salciarini, D. et al., 2017: Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications. *Energies*, 10(12), 2044.

ZABEZPEČENIE STABILITY ERODUJÚCEHO ZÁREZU ZA RODINNÝM DOMOM

ENSURING THE STABILITY OF THE ERODING CUT BEHIND THE BUNGALOW

Jakub Stacho[1], Jakub Panuška[2]

[1]Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: jakub.stacho@stuba.sk
[2] PanGEO s.r.o., Pražská 1451/15, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, e-mail: panuska.geotech@gmail.com

Abstrakt: Článok sa zaoberá návrhom stabilizačných opatrení 5,5 – 6,0 m vysokého zárezu, ktorý sa nachádza v bezprostrednej blízkosti rodinného domu. Zárez bol vytvorený v spraši, ktorá má charakter ílu strednej plasticity. Nakoľko bola stena zárezu vystavená už relatívne dlhú dobu poveternostným vplyvom, degradácia spraše zvetrávacími procesmi dosahovala značnú intenzitu. Hroziaci kolaps zvislej steny navyše priamo ohrozoval rodinný dom nachádzajúci sa približne 1,5 m od päty zárezu. Analyzované boli možnosti stabilizácie zárezu pre dané stiesnené podmienky. V kooperácii s architektom stavby bol navrhnutý oporný múr, pričom v bezprostrednej blízkosti rodinného domu bol oporný múr navrhnutý ako gabiónový a v ostatnej časti pozemku, kde to priestory dovoľovali, bol navrhnutý železobetónový uholníkový múr. Osobitú pozornosť bolo potrebné venovať postupu realizačných prác, nakoľko bola obava zo zrútenia steny zárezu na rodinný dom. Statické výpočty preukázali splnenie medzných stavov. Navrhnutý oporný múr vyhovel všetkým požadovaným kritériám.

Abstract: The article deals with the proposal of stabilization measures of a 5.5 – 6.0 m high cut slope located in the immediate vicinity of the family house. The cut has been made in loess, which has the character of clay with medium plasticity. The degradation of the loess wall reached a considerable intensity due to weathering processes. The impending collapse of the wall directly threatened the bungalow located only 1.5 m from the base of the notch. The possibilities of stabilization in given cramped conditions were analysed. In the immediate vicinity of the bungalow, the retaining wall was designed as a gabion wall. In the area where the premises were allowed, a reinforced concrete cantilever wall was designed. Attention had to be paid to the construction progress, as there was a fear of the collapse of the wall of the cut slope to the bungalow. The designed retaining wall met all the required criteria, and static calculations showed that the limit states were fulfilled.

Kľúčové slová: stabilita zárezu, gabiónový múr, oporná konštrukcia, železobetónový uholníkový múr

Key words: cut slope stability, gabion wall, retaining wall, concrete cantilever wall

1. Úvod

Rozširovanie miest a obcí je v posledných rokoch často spojené s nutnosťou výstavby rodinných a bytových domov vo svahovitom teréne. Z dôvodu, že sa jedná o „menšie“ stavebné projekty, pritom neraz absentuje projekt organizácie výstavby, resp. zariadenia staveniska. Pri rodinných a bytových domoch, ale aj príjazdových komunikáciách, sa stretávame s tým, že ako prvá prebieha výstavba samotnej nehnuteľnosti a až následne sa rieši zabezpečenie okolitých terénnych úprav. Zabezpečovanie terénnych úprav opornými konštrukciami tak môže byť hneď z niekoľkých dôvodov náročnejšie. Najčastejšie je problematický priestor pre zriadenie staveniska, pre manipuláciu, skladovanie materiálu potrebného pre výstavbu ako aj dostupnosť pre strojnú techniku. S takýmito stavbami sa stretávame na mesačnej báze a môžeme konštatovať, že ak by bol na začiatku vypracovaný projekt organizácie výstavby a jednotlivé stavebné úkony by na seba nadväzovali, v konečnom dôsledku by to investorovi prinieslo nie malé šetrenie finančných prostriedkov.

V predloženom príspevku je prezentovaný jeden takýto príklad, kedy bol navrhnutý rodinný dom v záreze. Po vykonaní hrubých terénnych úprav došlo ihneď k výstavbe samotného rodinného domu, pričom ten sa nachádzal len 1,2 m od hrany 5,5 – 6,0 m vysokého nezabezpečeného zárezu. Nezabezpečená stena zárezu z dôvodu prevažne poveternostných podmienok podliehala postupnej degradácii a bolo potrebné navrhnúť jej zabezpečenie. Pohľad na stenu nezabezpečeného zárezu je uvedený na obr. 1. V danom prípade sa vzhľadom na výšku steny zárezu a vlastnosti horninového prostredia nejednalo o vyslovene náročnú geotechnickú konštrukciu. Vzhľadom na stiesnené a komplikované podmienky bol náročný návrh postupu stavebných prác a realizácia samotnej geotechnickej konštrukcie, a to aj vzhľadom na hroziaci kolaps steny zárezu a zosunutie zeminy na rodinný dom.

Obr. 1 Pohľad na stenu nezabezpečeného zárezu v blízkosti rodinného domu
Fig. 1 View of the wall of an unsecured notch near a bungalow

2. Inžinierskogeologické pomery v mieste stavby a zhodnotenie nezabezpečeného zárezu

V mieste stavby sa na skladbe podložia podieľajú eolitické šprašoidné zeminy, ktorých hrúbka sa pohybuje v rozmedzí 10 – 15 m (Vančík, 2017). V ich podloží sa nachádzajú jemnozrnné neogénne zeminy. Stena zárezu, ktorej výška je do 6 m, je tak celá tvorená zo

spraše. Jedná sa o spraše typické ich nízkou prirodzenou vlhkosťou, vysokou súdržnosťou a nízkou plasticitou. Z hľadiska zatriedenia (podľa STN 72 1001:2010) sa jedná o íly so strednou plasticitou pevnej konzistencie, t. j. F6/CI. Do hĺbky 2,2 m sa vyskytujú antropogénne sedimenty. Od hĺbky 2,2 m bola zaznamenaná prímes vápnitých konkrécií $CaCO_3$. Podložie daného územia tvoria prakticky nepriepustné zeminy a hladina podzemnej vody sa nachádza až v hĺbke 8,8 – 9,2 m pod terénom, teda v hĺbke mimo dosahu stavebných prác. Do úvahy bolo potrebné brať zrážkovú vodu, kedy sa vzhľadom na nepriepustné podložie lokality musela venovať zvýšená pozornosť návrhu opatrení na odvod zrážkovej vody. Dôležité bolo navrhnúť také opatrenie, ktoré zabezpečí, aby nedochádzalo ku kumulovaniu zrážkovej vody v podloží, čo by mohlo spôsobiť výrazné zhoršenie vlastností jemnozrnných zemín.

Pri hodnotení obnaženej steny zárezu boli dôležitým faktorom klimatické vplyvy (zrážková voda, mráz, vysušovanie a pod.), ktoré vytvárali z dlhodobého hľadiska významné riziko zníženia šmykovej pevnosti zemín, čo posúvalo hodnotenie situácie do rizikovej oblasti (Turček, 2008). Nakoľko bola značná časť svahu obnažená a relatívne dlhú dobu vystavená poveternostným vplyvom, degradácia spraše zvetrávacími procesmi dosahovala už značnú intenzitu. Zvislá sprašová stena bola prestúpená množstvom zvislo orientovaných trhlín, viď. obr. 2. V dôsledku značného rozrušenia povrchových vrstiev bola takmer 6 m vysoká zvislá sprašová stena v kritickom stave a hrozil jej totálny kolaps (Turček, 2008). Bolo preto potrebné bezodkladne pristúpiť k návrhu sanačných opatrení.

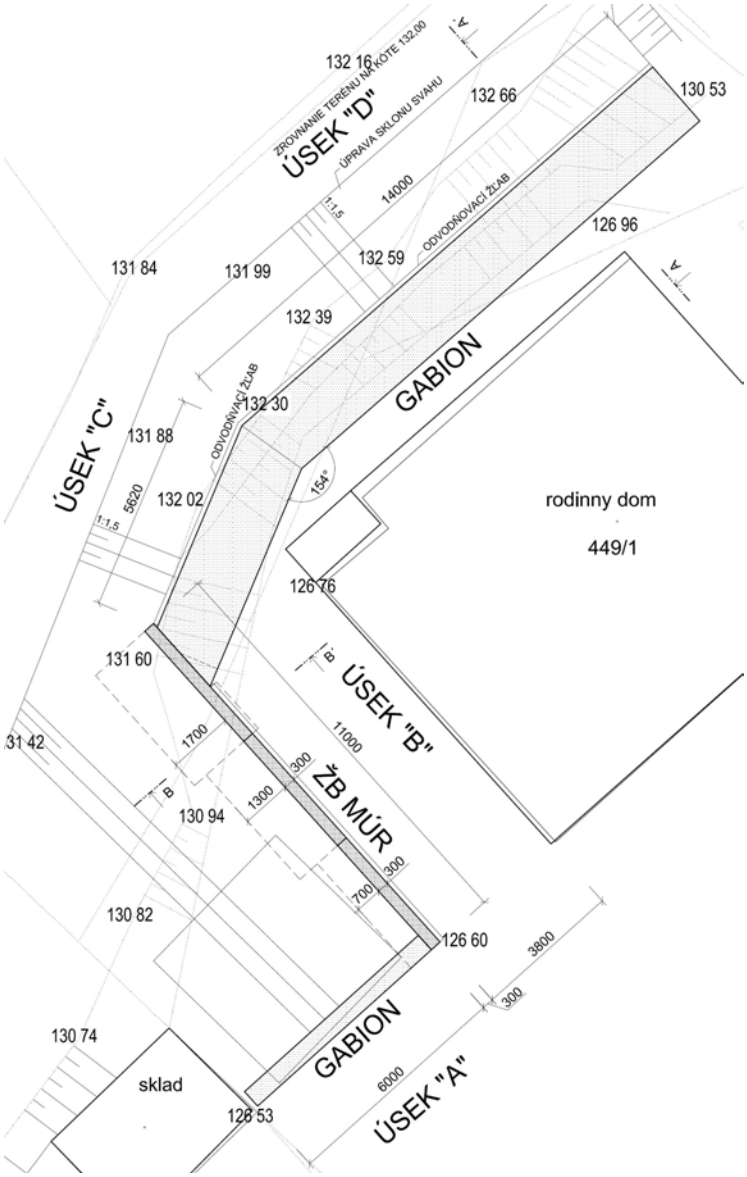
Obr. 2 Trhliny v zvislej sprašovej stene zárezu (Turček, 2008)
Fig. 2 Cracks in the vertical loess wall of the notch (Turček, 2008)

3. Návrh sanačného opatrenia – zabezpečenie stability zárezu gabiónovým múrom

Návrhu opornej konštrukcie predchádzali štúdie inžinierskogeologických pomerov v mieste stavby, obhliadky aktuálneho stavu ako aj konzultácie s investorom a architektom. Pri projektovaní opornej konštrukcie bolo potrebné zohľadniť extrémne stiesnené podmienky a blízkosť rodinného domu. S tým súvisel výber typu opornej konštrukcie ako aj analyzovanie možností postupu stavebných prác. Z dôrazom architekta na estetickú stránku geotechnickej konštrukcie bol oporný múr navrhnutý v časti ako železobetónový uholníkový múr a v časti ako gabiónový múr, viď obr. 3. V stiesnenom úseku bezprostredne za rodinným domom bol oporný múr navrhnutý ako gabiónový. Rozhodujúcim faktorom pre výber bol stiesnený priestor a možnosť výstavby gabiónového múru bez použitia strojnej techniky. Vľavo (podľa obr. 1) sa oporný múr navrhol ako uholníkový železobetónový – umožňoval to väčší manipulačný priestor pre výstavbu takéhoto typu opornej konštrukcie.

Statické výpočty sa realizovali použitím softvéru FINE Geo 5 (moduly *gabion* a *úhlová zeď*). Vo výpočtoch sa uvažovalo s homogénnym prostredím tvoreným ílom strednej plasticity, pevnej konzistencie. Návrh priečnych rozmerov oporných konštrukcií v zásade nepredstavoval väčší problém – jednalo sa o „bežný“ statický výpočet. Navrhnutý priečny rez

gabiónovým múrom je uvedený na obr. 4 a navrhnutý priečny rez uholníkovým železobetónovým múrom je uvedený na obr. 5.



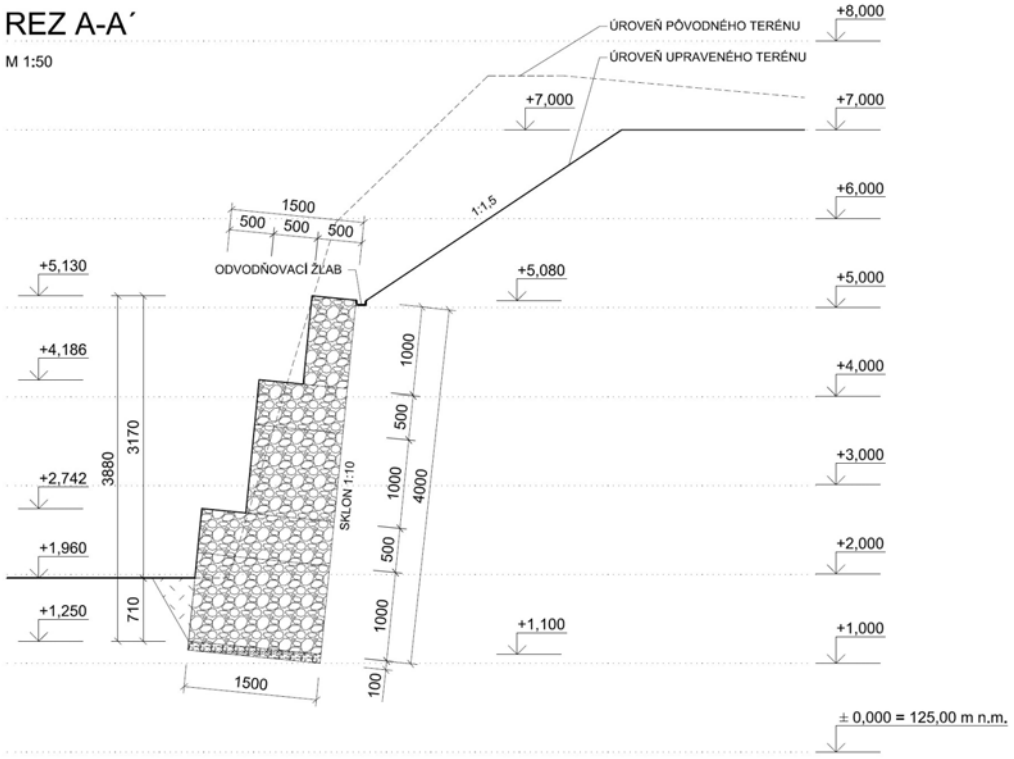
Obr. 3 Situácia rodinného domu a navrhnutých oporných konštrukcií
Fig. 3 Situation of a bungalow and design of retaining structures

Kritický bol návrh postupu stavebných prác. V prvom kroku bolo potrebné vykonať dočasný odkop tak, aby sa nenarušila stabilita celého zárezu a aby nedošlo k zosunutiu steny zárezu na rodinný dom. V mieste navrhovaného gabiónového múru (za rodinným domom) sa odporučilo použitie výlučne ručných pracovných prostriedkov. Jeden z pracovníkov musel počas výkopových prác vykonávať permanentný dozor steny zárezu, nakoľko hrozilo, že môže dôjsť k uvoľneniu väčšieho kusu sprašovej steny. Realizačné práce sa vykonali v suchom období, aby zrážková voda nenarušila stabilitu odkopávanej sprašovej steny (Panuška a Stacho, 2021).

Ihneď po vytvorení dočasného zárezu sa začalo s budovaním gabiónového múru – drôtokamennej konštrukcie z drôtových košov a prírodného lomového kameniva. Zvárané gabiónové koše boli doplnené o rohové výstuhy a dištančné spony z drôtu priemeru 4 mm, spájané oceľovými špirálami rovnakého priemeru. Lícna strana košov sa plnila ručne

z kamenných kusov presahujúcich 1,5 násobok oka zváranej siete. Vnútorná výplň sa navrhla z frakcie 32 – 64 mm. Gabiónový múr celkovej výšky 4,0 m bol navrhnutý ako šikmý so sklonom 1:10. Odstupňovanie oporného múru bolo projektované z pohľadovej strany.

Zvyšná (horná) časť zárezu sa navrhla ako svahovaná pod sklonom 1:1,5, aby bolo možné zatrávnenie plochy. Za hornú hranu gabiónového múru sa umiestnil odvodňovací rigol, ktorým sa odviedla povrchová zrážková voda mimo priestor gabiónového múru. Navrhnuté to bolo z dôvodu, že gabiónový múr predstavuje sám o sebe drén, kde by v jeho základovej škáre mohlo dochádzať k akumulovaniu zrážkovej vody a tak k zhoršovaniu vlastností pôvodného horninového prostredia.

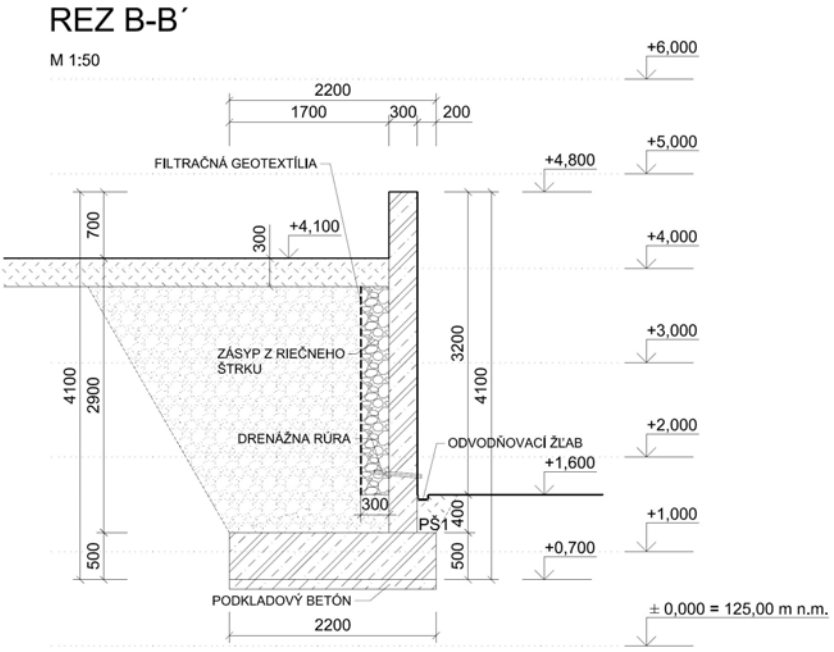


Obr. 4 Priečny rez navrhnutým gabiónovým múrom
Fig. 4 Cross section of the designed gabion wall

Uholníkový oporný múr bol navrhnutý ako železobetónová konštrukcia, rozmery v priečnom reze uvádza obr. 5. Železobetónový uholníkový múr bol navrhnutý z betónu pevnostnej triedy C25/30 a betonárskej ocele B500B. Do steny uholníkového múru bolo navrhnuté osadenie odvodňovacích rúrok priemeru 50 mm a za stenou uholníkového múru bol navrhnutý „drenážny komín“ hrúbky 0,3 m – zhotovený z riečneho štrku frakcie 16 – 32 mm a chránený filtračnou geotextíliou. Zvyšnú časť spätého zásypu sa navrhla z drveného štrku frakcie 0 – 63 mm (Panuška a Stacho, 2021).

Statické návrhy preukázali splnenie všetkých požiadaviek z hľadiska geotechnického návrhu. Z hľadiska posúdenia na medzné stavy únosnosti (MSÚ) boli rozhodujúce posúdenia na preklopenie, vodorovnú a zvislú únosnosť, ako aj posúdenie celkovej (globálnej) stability (tab. 1). Postup analytického výpočtu, ktorý softvér aplikuje, podrobne uvádza napr. Turček a kol. (2016). V prípade posúdenia celkovej stability je uvedený výsledok pre metódu posúdenia podľa Peterssona, ktoré je najkonzervatívnejšiu z metód, ktoré použitý softvér ponúka. Výsledky sú prezentované formou percentuálneho pomeru zaťaženia k únosnosti/odolnosti, príp. pomeru stabilizujúcich účinkov k destabilizujúcim. Na posúdenie medzného stavu používateľnosti (MSP) je v tab. 1 uvedená konečného celkového sadnutia. V oboch prípadoch išlo o malú hodnotu deformácie, t. j. 0,9 mm pre gabiónový múr a 2,0 mm

pre železobetónový uholníkový múr, ktorá bola menšia ako limitná hodnota sadnutia, čím sa splnila požiadavka MSP.



Obr. 5 Priečny rez navrhnutým železobetónovým múrom
Fig. 5 Cross section of the designed concrete cantilever wall

Tab. 1 Vlastnosti horninového materiálu
Tab. 1 Properties of the rock material

Typ opornej konštrukcie	**Rez**	**MSU**				**MSP**
		Preklopenie	**Únosnosť**		**Celková stabilita**	**Sadnutie**
			Zvislá	**Vodorovná**		
		Využiteľnosť (%)				***s* (mm)**
Gabión múr	A-A´	86,8	95,3	91,8	66,5	0,9
ŽB múr	B-B´	72,4	85,0	82,1	39,2	2,0

4. Záver

Z dôvodu značnej degradácie zvislej sprašovej steny zárezu bolo potrebné pristúpiť k návrhu stabilizačných opatrení, nakoľko jej hroziaci kolaps priamo ohrozoval len 1,5 m vzdialený rodinný dom. Stiesnené podmienky vznikli zo zadnej strany rodinného domu, kde bolo navrhnuté zabezpečenie stability zárezu gabiónovým múrom. Navrhnuté bolo realizovanie dočasných výkopových prác len s použitím ručných pracovných prostriedkov za vykonávania permanentného vizuálneho sledovania sprašovej steny, nakoľko hrozilo uvoľneniu väčšieho kusu sprašovej steny. Navrhnutý gabiónový múr mal výšku 4,0 m, sklon 1:10 a odstupňovanie z pohľadovej strany. Zvyšná časť zárezu za gabiónovým múrom sa navrhla ako svahovaná v sklone 1:1,5. Z bočnej strany rodinného domu, kde to väčší priestor dovoľoval, bol navrhnutý železobetónový uholníkový múr. Statické návrhy preukázali splnenie všetkých požiadaviek z hľadiska geotechnického návrhu. V danom prípade bolo možné vidieť nevhodne zvolený postup výstavby, kedy bol ako prvý postavený rodinný dom v tesnej blízkosti obnaženého 6 m hlbokého zárezu, a následne bolo potrebné realizovanie zabezpečenia stability zárezu opornou konštrukciu. Z dôvodu stiesnených podmienok, predovšetkým za rodinným domom, sa značne skomplikovalo ťaženie zeminy pri realizácii

dočasných výkopov a taktiež následná manipulácia so stavebným materiálom a budovaním oporných konštrukcií. Nemožnosť použitia strojnej techniky a s tým súvisiaci dlhší čas potrebný na výstavbu oporných múrov sa v konečnom dôsledku prejavili v ekonomickej nákladoch.

Zoznam literatúry

Vančík, Ľ., 2017: Senec – Nová Tehelňa, obytná zóna. Podrobný inžinierskogeologický prieskum. Bratislava, 19 s.

Turček, P., 2008: Expertízne posúdenie svahu pri rodinnom dome v Senci, Bratislava, 6 s.

Panuška, J., Stacho, J., 2021: Stabilita zárezu za rodinným domom – Návrh oporných múrov, Statický výpočet, Bratislava, 8 s + prílohy.

Turček, P., Súľovská M., Stacho J., 2016: Zakladanie stavieb: Stavebné jamy, oporné konštrukcie a zlepšovanie zemín. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 203 s.

VPLYV METODIKY SKÚŠOK NA STANOVENIE ZÁKLADNÝCH VLASTNOSTÍ BENTONITOV

IMPACT OF THE TESTING METHODS ON INTRINSIC PROPERTIES OF BENTONITES

Jana Frankovská[1], Martin Brček, Miloslav Kopecký

[1]Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: jana.frankovska@stuba.sk

Abstrakt: Určenie vhodných a reprezentatívnych pevnostných a deformačných parametrov na základe laboratórnych alebo terénnych skúšok je nevyhnutným a základným krokom v každom procese navrhovania geotechnických konštrukcií. Väčšina metód na stanovenie vlastnosti zemín je štandardizovaná. V praxi sa však aj pri určení vlastností zemín stretávame s nekonvenčnými metódami, ktoré je potrebné použiť hlavne pre geomateriály s „extrémnymi“ vlastnosťami. Takými sú napríklad íly s extrémne vysokou plasticitou, bentonity. V článku sa venujeme stanoveniu medze tekutosti a stanoveniu hustoty pevných častíc pre vzorky bentonitov z ložísk v okolí Kremnice.

Abstract: Geotechnical properties may vary locally and there are uncertainties in the parameters and in the models. The laboratory tests for determining the liquid and plastic limits are far the most widely used of index tests and are often adopted to assess the mechanical behaviour of clay. The results of laboratory investigation for determination of liquid limits using fall-cone method and method based on Casagrande type devices were analysed for bentonites. Density of soil particles were determined by pycnometer method by fluid displacement and a pycnometer method by gas displacement. Helium was used as the measurement gas.

Kľúčové slová: bentonity, geotechnické vlastnosti, hustota pevných častíc, medza tekutosti

Key words: bentonites, ground properties, density of soil particles, liquid limit

1. Úvod

Počiatočný stav zeminy (zeminu v prirodzenom uložení) môžeme charakterizovať dvoma súbormi geotechnických parametrov: opisnými a stavovými Opisné vlastnosti sú pre danú zeminu konštantné, nezávislé od napätia, deformácie, času a pod. Takéto vlastnosti sú označované aj ako základné fyzikálne vlastnosti zemín, alebo klasifikačné vlastnosti. Je to z dôvodu, že ich potrebujeme na opis a klasifikáciu zemín. Pre jemnozrnné zeminy je to najmä zrnitosť a konzistenčné (Atterbergove) medze. Geotechnickými parametrami, ktoré charakterizujú fyzický stav zeminy (stavové parametre) a nie sú pre zeminu konštantné, sú napríklad vlhkosť a objemová hmotnosť zeminy v prirodzenom stave. Pre jemnozrnné zeminy je to konzistencia zeminy, pre hrubozrnné uľahnutosť.

Základné fyzikálne vlastnosti zemín sú označované v geotechnike aj ako indexové vlastnosti. Na základe nich môžeme použitím vhodných korelácií stanoviť pevnostno-deformačné alebo hydraulické vlastnosti zemín, t. j. parametre pevnosti, stlačiteľnosti alebo koeficient filtrácie. Je to potrebné najmä v prípade, že nie je možné uskutočniť priame terénne alebo laboratórne skúšky alebo pre predbežný návrh geotechnických konštrukcií.

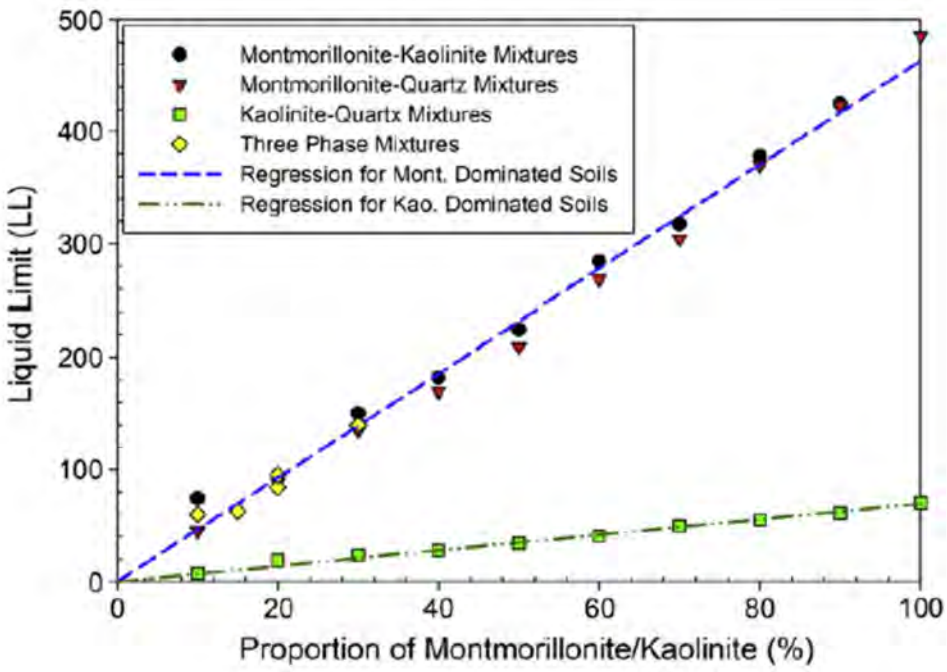
V článku sa venujeme stanoveniu medze tekutosti a hustoty pevných častíc pre íly s veľmi vysokou a extrémne vysokou plasticitou, ktoré reprezentujú vzorky bentonitov.

Bentonit je hornina, v ktorej majú dominantné zastúpenie ílové minerály zo skupiny smektitov a ktorá má odpovedajúce vlastnosti vyplývajúce z kryštálovej štruktúry tejto skupiny: výmennú kapacitu katiónov, sorpciu, napúčavosť, tixotropiu (Kraus, Kužvart, 1987). Bentonity majú veľmi veľký merný povrch. Kvalitný bentonit dosahuje merný povrch 800 m^2 /g. Ďalšou významnou vlastnosťou bentonitu je extrémne vysoká plasticita. Ložiská bentonitu sa nachádzajú v neovulkanických pohoriach na strednom a východnom Slovensku. Pre laboratórny výskum boli odobrané vzorky bentonitov z ložísk v Kremnickom stratovulkáne. Skúšobné vzorky boli odobrané na ložiskách bentonitov: Kopernica, Stará Kremnička – Jelšový potok, Lutila, Stará Kremnička a Bartošova Lehôtka.

2. Laboratórne stanovenie konzistenčných medzí

Konzistenčné medze zahŕňajú medzu tekutosti, plasticity a zmraštiteľnosti. Tieto medze sa nazývajú aj Atterbergove medze podľa švédskeho inžiniera Alberta Atterberga, ktorý ich definoval na začiatku 20. storočia a publikoval ich stanovenie v roku 1911. Sú dôležitými charakteristikami jemnozrnných zemín, pretože určujú ich geotechnické vlastnosti. Atterbergove medze sú empiricky stanovené vlhkosti, ktoré reprezentujú zmeny v správaní zeminy. Medza tekutosti a medza plasticity poskytujú dôležité informácie o charaktere jemnozrnných zemín a stanovujú sa relatívne jednoduchými laboratórnymi skúškami.

Konzistenčné medze závisia od mineralogického zloženia a čím viac smektitov zemina obsahuje, tým väčšiu hodnotu dosahujú. Dokumentuje to napr. obr. 1, kde modrá čiara prezentuje závislosť medze tekutosti od množstva montmorillonitov v zemine. Zelená čiara prezentuje závislosť medze tekutosti od obsahu kaolinitu (*Tiwari, Ajmera, 2011*).



Obr.1 Vzťah medze tekutosti a obsahu ílových minerálov (Tiwari, Ajmera, 2011)
Fig. 1 Liquid limit and clay minerals content (Tiwari, Ajmera, 2011)

Hodnoty konzistenčných medzí pre vybrané ílové minerály sú uvedené v tabuľke 1.

Tab.1 Konzistenčné medze vybraných ílov (Mitchell, 1996)
Tab. 1 Consistency limits based on clay minerals (Mitchell, 1996)

Minerál	Medza zmraštenia (%)	Medza plasticity (%)	Medza tekutosti (%)
Kaolinit	25 – 29	25 – 40	30 – 110
Illit	15 – 17	35 – 60	60 – 120
Montmorillonit	8,5 – 15	50 – 100	100 – 900

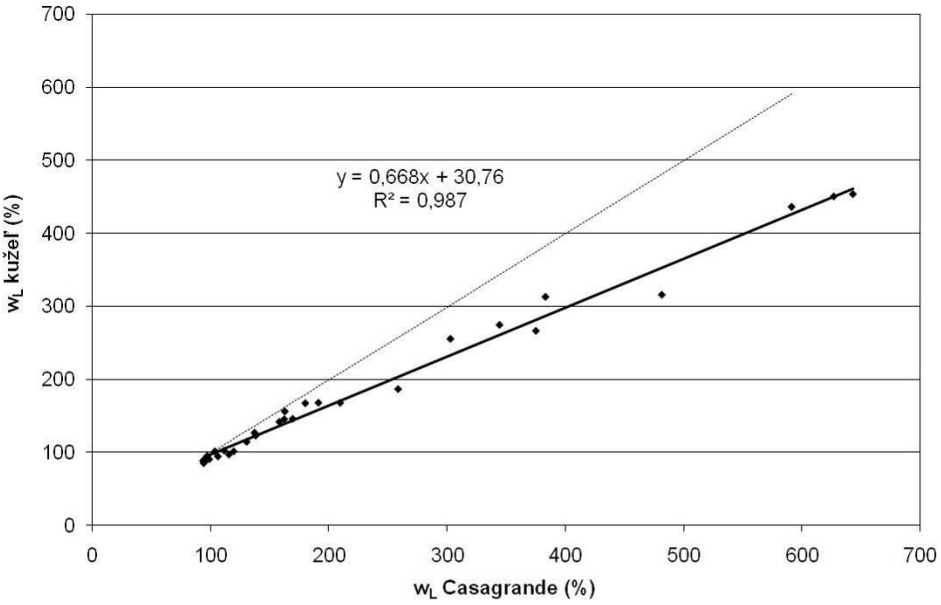
Medza tekutosti je empiricky stanovená vlhkosť, pri ktorej zemina prechádza zo stavu tekutosti do stavu plastického. Eurokód 7 a STN 72 1014 definuje dve metódy na stanovenie medze tekutosti: Casagrandeho metódu a kužeľovú penetračnú metódu. Kužeľová penetračná metóda je založená na meraní penetrácie zeminy štandardizovaným kužeľom určenej hmotnosti. Používa sa v Škandinávii od roku 1915 (*Bjerrum a Flodin, 1960*). Na stanovenie medze tekutosti sa odporúčajú dva druhy kužeľov. Líšia sa uhlom kužeľa, jeho hmotnosťou a hĺbkou penetrácie, pri ktorej sa stanoví medza tekutosti. Sú označené ako britský (30°/80 g) a švédsky kužeľ (60°/60 g). Na základe výsledkov štúdie porovnania výsledkov v piatich laboratóriách v Európe: TCD Írsko, BAW Nemecko, RGD Holandsko, SGI Švédsko a BRE Veľká Británia bolo preukázané, že uvedené dva typy kužeľov dávajú pre geotechnickú prax v podstate rovnaké hodnoty medze tekutosti (*Farrell a kol.,1999*).

2.1 Porovnanie medzí tekutosti stanovených Casagrandeho prístrojom a kužeľovou metódou

Príprava vzorky je pre obidve metódy stanovenia medze tekutosti rovnaká. Množstvo potrebnej zeminy na vykonanie skúšky je väčšie pre kužeľovú skúšku, vykonanie ktorej vyžaduje asi 200 g zeminy. Kužeľová skúška nie je rýchlejšia, ale je spoľahlivejšia, lebo mechanizmus skúšky závisí priamo od statickej šmykovej pevnosti zeminy. Pre jemnozrnné zeminy s medzou tekutosti od 30 % do 50 % sú výsledky skúšania použitím uvedených dvoch metód porovnateľné (*Frankovská, Dananaj, 2006*). Pre zeminy s w_L vyššou ako 50 % je medza tekutosti stanovená kužeľovou metódou nižšia ako medza tekutosti, stanovená Casagrandeho metódou (obr. 2). Rozptyl hodnôt medze tekutosti určenej uvedenými dvomi metódami sa zvyšuje so zvyšujúcou hodnotou medze tekutosti lineárne a dosahuje rozdiel 20 % pre zeminy s medzou tekutosti do 170 %. Pre bentonity môže byť rozdiel v stanovení vlhkosti na medzi tekutosti až 180 %.

2.2 Výsledky stanovenia medze tekutosti bentonitov z Kremnických vrchov

Pre skúšobné vzorky bentonitov z ložísk bentonitov Kopernica, Stará Kremnička – Jelšový potok, Lutila I, Stará Kremnička III, Bartošova Lehôtka II sa zistili významné rozdiely vo vyhodnotení medze tekutosti v dôsledku použitej laboratórnej metodiky. Všetky vzorky boli klasifikované ako íly s veľmi vysokou a extrémne vysokou plasticitou v zmysle STN 72 1001. Medza tekutosti sa pohybovala od 104 % do 124 % pre Casagrandeho metódu a od 98 % do 115 % pre kužeľovú penetračnú skúšku. Najvyššie hodnoty medze tekutosti boli dosiahnuté na lokalitách Jelšový potok a Kopernica. Rozdiel v hodnotách medze tekutosti v závislosti od použitej metodiky je od 2 do 20 %.



Obr.2 Porovnanie medzí tekutosti stanovených Casagrandeho prístrojom a kužeľovou metódou pre w_L > 90% (Frankovská, Dananaj, 2006)
Fig. 2 *Casagrande and Fall cone methods for soils with w_L > 90% (Frankovská, Dananaj, 2006)*

3. Analýza hustoty pevných častíc zemín

Pod hustotou sa rozumie fyzikálna veličina, ktorá vo všeobecnosti vyjadruje hmotnosť objemovej jednotky ľubovoľného materiálu (*Durmeková a kol., 2013*). Hustotu pevných častíc – mernú hmotnosť – môžeme definovať ako hustotu, ktorá vyjadruje hmotnosť objemovej jednotky pevnej fázy horniny, t. j. bez pórov, dutín a trhlín.

3.1 Metódy stanovenia mernej hmotnosti

Merná hmotnosť sa stanovuje v laboratóriu najčastejšie v pyknometri typu Gay-Lussac (nádobka so špeciálnou zátkou, ktorá má presnosť určenia objemu na tisícinu mililitra) s objemom 50 ml, resp. 100 ml. V prípade problematických typov hornín (napr. objemovo nestále ílovité horniny) alebo pri vyšších nárokoch na presnosť stanovenia sa merná hmotnosť stanovuje v plynovom pyknometri, štandardne s použitím hélia. Metóda plynovej pyknometrie využíva vlastnosť expanzie a stlačenia plynov so zmenou tlaku pri konštantnej teplote. Vhodným plynom pre túto laboratórnu metódu je hélium z dôvodu, že ide o inertný plyn, ako aj z dôvodu malého rozmeru molekúl, čím je schopné vnikať aj do nepatrných pórov a kapilár zdanlivo kompaktného materiálu. Princíp metódy je vysvetlený napr. v článku Adamcovej (Adamcová a kol., 2006). Hodnoty výslednej mernej hmotnosti hornín sa pohybujú najčastejšie v rozsahu od 2 400 do 3 000 kg.m^{-3}. Meranie je rýchle a poskytuje presné výsledky, na čas náročnejšia je však príprava vzorky. Rýchlosť merania je limitovaná časom, potrebným na dosiahnutie teplotnej stability.

3.2 Výsledky stanovenia hustoty pevných častíc bentonitov z lokalít v Kremnických vrchoch

Na stanovenie hustoty pevných častíc (mernej hmotnosti) sa porovnali dve metódy – pomocou pyknometra s vodou a pomocou plynového (héliového) pyknometra (typ *ULTRAPYC 1200e*, *Quantachrome Instrument*, postup podľa ASTM D6093-97:2011, DIN 18121-2:2010).

Pre skúšobné vzorky bentonitov sa zistili významné rozdiely vo výsledkoch – vyhodnotení hustoty pevných častíc v dôsledku použitej metodiky. Výsledné hodnoty sa pre laboratórnu skúšku v pyknometri s vodou pohybovali od 2,63 g/cm^3 do 2,83 g/cm^3 a pre plynový ultrapyknometer s héliom od 2,31 g/cm^3 do 2,39 g/cm^3. Rozdielmi v hodnotách v závislosti od použitej metodiky sa budeme naďalej zaoberať.

4. Záver

Medza tekutosti zemín ale aj ďalšie základné fyzikálne parametre zemín sú dôležité geotechnické parametre na určenie pevnostno-deformačného správania jemnozrnných zemín. Jej hodnoty závisia najmä od mineralogického zloženia zemín. Správne stanovenie medze tekutosti je dôležité z dôvodu používania tohto základného geotechnického parametru zemín pre korelácie s ďalšími parametrami charakterizujúcimi pevnosť, stlačiteľnosť a hydraulické vlastnosti zemín, ktoré priamo vstupujú do výpočtových modelov na navrhovanie geotechnických konštrukcií. Casagrandeho metóda (1932) je založená na predpoklade, že šmyková pevnosť všetkých zemín na medzi tekutosti musí mať konštantnú hodnotu. Podľa našich meraní, ktoré sú v súlade s poznatkami Leroueila (1996) a ďalších autorov, sa neodvodnená šmyková pevnosť pri vlhkosti na medzi tekutosti znižuje so zvyšujúcou sa medzou tekutosti. Táto skutočnosť je dôvodom, prečo sú hodnoty medze tekutosti stanovené Casagrandeho a kužeľovou metódou rozdielne najmä pre vysokoplastické zeminy. Uvádzanie použitej metódy na stanovenie medze tekutosti zemín v správe z prieskumu horninového prostredia je potrebné najmä pre bentonity.

Pre vysokoplastické íly sú rozdielne výsledky stanovenia mernej hmotnosti v závislosti od pyknometra s vodou alebo plynom, ktoré sú v súčasnosti štandardnými geotechnickými metódami v zmysle európskych noriem. Rozdiely 10 % až 30 %, ktoré sme namerali pre rôzne vysokoplastické íly vrátane uvedených vzoriek bentonitov (spolu 33 vzoriek), budeme naďalej skúmať.

Cieľom nášho článku bolo poukázať na to, že pre vysokoplastické zeminy je potrebné uvádzať použitú laboratórnu metodiku stanovenia medze tekutosti, mernej hmotnosti, ale aj zrnitosti a správne interpretovať výsledky skúšok.

Poďakovanie

Príspevok je jedným z výstupov výskumnej úlohy APVV-20-0175.

Zoznam literatúry

Adamcová, R., Haasová, Z., Schugerl, R., Magulová B., 2006: Alternatívne metódy pre laboratórne stanovenie vybraných vlastností bentonitov. In: Geológia a životné prostredie 5, Bratislava, 14. a 15.júna 2006, 12 s.

Bjerrum, L., Flodin, N., 1960: The development of soil mechanics in Sweden 1900-1925, Geotechnique, 16 (1), s. 1-18.

Durmeková, T., Wagner, P., Frankovská, J., 2013: Vlastnosti hornín a ich stanovenie v laboratóriu: I. Skalné horniny. 1.vyd. Bratislava : Univerzita Komenského v Bratislave, 2013. 173 s.

Farrell, E., Schuppener, B., Wassing, B., 1999: ETC 5 Fall-cone study. In Recommendations of the ISSMGE for Geotechnical Laboratory Testing, ISSMGE, DIN 1999, s.103-110.

Farrell, E., 1995: Workshop Liquid and plastic limits, In: Proc. 11th ECSMFE, Copenhagen 1995, DGS, Bulletin 11, Vol. 10, s. 161-168.

Frankovská, J., Dananaj, I., 2006: Determination of liquid limits of fine grained soils, Slovak Geological Magazine, Vol. 12, No. 1, s. 69 -75.

Kraus ,I., Kužvart M., 1987: Ložiska nerud. Praha : SNTL, 1987, 232 s

Tiwari1, B., Ajmera, B., 2011: Consolidation and Permeability of Clay Minerals – Expansive to Non-expansive, Geo-Frontiers 2011, ASCE 2011, s. 2414 – 2423.

ŠTÚDIUM INŽINIERSKEJ GEOLÓGIE A HYDROGEOLÓGIE – 70. VÝROČIE EXISTENCIE NA PRÍRODOVEDECKEJ FAKULTE UK V BRATISLAVE

STUDY OF ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY – 70th ANNIVERSARY OF THE EXISTENCE AT THE FACULTY OF NATURAL SCIENCES, COMENIUS UNIVERSITY IN BRATISLAVA

Martin Bednarik[1], Renáta Fľaková[1], Tatiana Durmeková[1]

[1]Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky PRIF UK, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: mbednarik@uniba.sk

Abstrakt: Univerzita Komenského v Bratislave ako jediná vysoká škola na Slovensku poskytuje vysokoškolské vzdelávanie v odboroch inžinierska geológia a hydrogeológia. 70 rokov existencie tohto štúdia (1952 – 2022) svedčí o životaschopnosti, kvalite výučby a asi aj potrebnosti oboch geologických odborov v spoločnosti. Vznik, história a existencia študijného odboru alebo po novom študijného programu inžinierska geológia a hydrogeológia úzko súvisí so životom dvoch pracovísk Katedrou inžinierskej geológie a Katedrou hydrogeológie, ktoré toto štúdium na Prírodovedeckej fakulte UK v Bratislave spoločne zabezpečujú.

Abstract: Comenius University in Bratislava, as the only university in Slovakia, provides higher education in the fields of engineering geology and hydrogeology. The 70 years of this study (1952 - 2022) testify about its viability, the quality of teaching and probably also about the need of both geological branches in society. The establishment, history and existence of the engineering geology and hydrogeology study fields are closely related to the life of two departments Department of Engineering Geology and Department of Hydrogeology that jointly provide these studies at the Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava.

Kľúčové slová: inžinierska geológia, hydrogeológia, vysokoškolské štúdium, Univerzita Komenského v Bratislave

Key words: engineering geology, hydrogeology, university study, Comenius University in Bratislava

1. Úvod

Učebné osnovy študijného odboru (programu) inžinierska geológia a hydrogeológia pozostávajú z náplne dvoch samostatných geologických odborov. I keď obsah každého z nich je dostatočne rozsiahly na existenciu samostatného štúdia, príprava absolventov v oboch odboroch beží od prvopočiatkov spoločne a ukazuje sa, že práve táto okolnosť je prínosom pre absolventov a bonusom tohto študijného programu. Od svojho začlenenia do univerzitného vzdelávania v roku 1952, študijný odbor sa postupne profiloval, dopĺňal a kreoval svoju náplň, zvyšoval úroveň prípravy absolventov. Vo svojej histórii zaznamenal

spolu s pracoviskami, na ktorých sa vyučoval, horšie i lepšie časy. Zo začiatku bolo potrebné najmä vyriešiť nedostatok priestorov na výučbu a na zriadenie laboratórií, ako aj nedostatok prístrojového vybavenia. Postupne, so zvýšeným záujmom o absolventov tohto študijného programu v spoločnosti, prišli úspechy, vzostupy a uznanie. Masívnejší rozvoj a stabilita nastali najmä v 70-tych a 80-tych rokoch minulého storočia. Náročnejšie časy na uskutočňovanie výučby v tomto programe začali po celospoločenských zmenách v 90-tych rokoch minulého storočia a pretrvajú už desaťročia. V súčasnosti program stále existuje, ale viac-menej stagnuje a iba prežíva. Je to z viacerých príčin, ale najmä z reality, že odbor geológia všeobecne zažíva výrazný úpadok záujmu v radoch študentov.

Prvých 50 rokov existencie študijného odboru inžinierska geológia a hydrogeológia na Prírodovedeckej fakulte UK v Bratislave je veľmi podrobne zdokumentovaných v publikácii, ktorá bola zostavená širokým autorským kolektívom k 50. výročiu existencie tohto študijného odboru (Matula a kol., 2002). Z toho dôvodu sa v tomto príspevku zameriavame viac na priblíženie ostatných 20 rokov.

2. Stručne z histórie

Poskytovanie výučby v študijnom odbore (programe) inžinierska geológia a hydrogeológia je úzko späté so zriadením a činnosťou Katedry inžinierskej geológie, ktorá vznikla v roku 1952 nariadením vlády na vtedajšej Fakulte geologicko-geografických vied na Univerzite Komenského rozdelením pôvodnej veľkej geologickej katedry. Udialo sa to v odozve na rozvoj stavebníctva a požiadavky praxe na posudzovanie geologických podmienok výstavby, najmä vodných diel, ciest, železníc, tunelov i priemyselných komplexov. V roku 1953 už boli v tomto odbore obhájené prvé diplomové práce s témami vyjasnenia geologických pomerov územia viacerých vodných tokov Slovenska, na ktorých bola plánovaná výstavba vodných diel. Prvým vedúcim katedry bol prof. Ing. Samuel Hlôška z Katedry nerastných surovín, pretože v tom čase nebolo na novovyčlenenej katedre pracovníka s kvalifikáciou požadovanou pre funkciu vedúceho katedry. Jeho zástupcom bol Ing. M. Matula (ktorý potom viedol katedru po získaní docentúry od roku 1957). V roku 1958, po pobyte významného hydrogeológa prof. A. M. Ovčinnikova z Moskovského geologicko-prieskumného inštitútu, katedra rozšírila zameranie a výskum o štúdium podzemných vôd a hydrogeologické úlohy a bola premenovaná na Katedru inžinierskej geológie a hydrogeológie. V tom istom roku 1958, Fakulta geologicko-geografických vied zanikla a katedry tejto fakulty boli od roku 1959 včlenené do Prírodovedeckej fakulty UK.

V akademickom roku 1977/1978 došlo k odčleneniu Katedry hydrogeológie zo spoločnej katedry. Jej vedúcim sa stal doc. RNDr. Ladislav Melioris, CSc. Bol to odraz úspešného rozvoja oboch odborov, spojený s pribúdaním zamestnancov i priestorov. Spoločný študijný program na výchovu absolventov ostal zachovaný.

Štúdium inžinierskej geológie a hydrogeológie bolo od prvopočiatkov päťročné. Po prijatí zákona č. 131/2002 o vysokých školách od školského roku 2002/2003 bol na všetkých vysokých školách na Slovensku zavedený kreditový systém a štúdium sa začalo poskytovať vo viacerých stupňoch podľa vzoru európskych univerzít.

3. Úspešné roky

Pri spätnom pohľade, 70-te a 80-te roky 20. storočia možno považovať za úspešné obdobie existencie odborov inžinierskej geológie a hydrogeológie, čo sa prejavilo aj vo výučbe a v príprave absolventov.

Veľké stavebné projekty v čoraz zložitejších geologických podmienkach, výskyt katastrofických zosuvov a od 70-tych rokov minulého storočia aj zvýšená pozornosť otázkam

ochrany životného prostredia si vyžadovali výchovu špecialistov – inžinierskych geológov a hydrogeológov, a prispievali k rozvoju oboch katedier. Množstvo riešených úloh vo výskume i v praxi prinieslo rozmach oboch odborov. Ako už bolo uvedené, od 1. septembra 1977 sa katedry rozvíjali samostatne, podieľali sa pritom na spoločnej výchove absolventov zabezpečovaním jedného spoločného študijného programu.

Zo všetkých úrovní vtedy riadeného odvetvia geológie SGÚ sa ozývali požiadavky na väčší počet absolventov geológie, na prehĺbenie ich širšej kvalifikácie i užšej špecializácie, na zvýšenie ich schopnosti riešiť modernými prostriedkami aktuálne úlohy praxe i zvládať úlohy riadenia (Matula a kol., 2002). Rezort SGÚ požadoval ročne 74 absolventov, hlavne pre aplikované geologické odbory – ložiskovú geológiu, geofyziku, hydrogeológiu a inžiniersku geológiu.

2.1 Katedra inžinierskej geológie

Výraznou osobnosťou na Katedre inžinierskej geológie bol jej dlhoročný vedúci katedry prof. Ing. Milan Matula, DrSc. Za vedúceho katedry bol menovaný v roku 1957 a v tejto pozícii bol až do roku 1986, čiže temer 30 rokov. Pod jeho vedením sa katedra stala celoštátne i medzinárodne uznávaným centrom výchovy absolventov v odbore. Postupne zabezpečil priestory na existenciu katedry, zriadil a vybudoval laboratóriá. Od roku 1969 mala katedra hlavne jeho zásluhou kompletne vybavené laboratóriá na zisťovanie a výskum litologicko-opisných, základných fyzikálnych a mechanických vlastností zemín a skalných hornín, i zabezpečenú terénnu vrtnú techniku. Na katedre sa sústredili odborníci a špecialisti v širokom kolektíve, ktorý bol schopný zveľaďovať odbor, vyučovať, získavať nové poznatky a riešiť úlohy praxe. V tých časoch sa uplatnilo na katedre cca 14 vysokoškolských učiteľov a vedeckých pracovníkov a súčasťou pracovného tímu katedry bol rozsiahly technický personál. Vtedajší vedecký prínos prof. Matulu spočíval najmä vo vypracovaní metodík zostavovania inžinierskogeologických máp rôznych mierok. Bol autorom prvej inžinierskogeologickej mapy Slovenska i autorom prvej monografie Regionálna inžinierska geológia československých Karpát, ktorá vyšla i v anglickom preklade v roku 1969 vo vydavateľstve SAV a vzbudila veľký medzinárodný ohlas, a následne vyvolala aj výrazný nárast návštev odborníkov zo zahraničia na katedre. Katedra sa podieľala na vypracovávaní inžinierskogeologických podkladov pre investičnú výstavbu, na registrácii zosuvov, tvorbe metodiky zostavovania máp, a rozvíjala metódy na získavanie čo najpresnejších informácií o geologickom prostredí.

Do histórie katedry sa výrazne zapísali aj ďalší učitelia, ktorí postupne nastupovali do funkcie vedúceho katedry; všetci boli žiaci a kolegovia prof. Matulu: prof. RNDr. Rudolf Ondrášik, DrSc. (1986 – 1993), doc. RNDr. Miroslav Hrašna, CSc. (1993 – 1999), doc. RNDr. Rudolf Holzer, CSc. (1999 – 2005), doc. RNDr. Ján Vlčko, CSc. (2005 – 2012), doc. RNDr. Renáta Adamcová, PhD. (2012 – 2020).

2.2 Katedra hydrogeológie

Samostatná Katedra hydrogeológie vznikla 1. 9. 1977, vyčlenením sa zo spoločnej Katedry inžinierskej geológie a hydrogeológie. V krátkom období od 1989 do 1995 katedra fungovala pod názvom Katedra podzemných vôd. Vzdelávanie a výskumná činnosť v oblasti hydrogeológie začína už koncom 50 rokov 20. storočia, pričom začiatky sú spojené s objavením vzácnej minerálnej vody (dnes kúpele Nimnica) pri budovaní Nosickej priehrady. Vtedy si inžinierski geológovia uvedomili, aké je dôležité vychovať aj hydrogeológov. Katedra hydrogeológie riešila široké spektrum úloh základného a aplikovaného hydrogeologického výskumu, najmä so zameraním na metódy výskumu,

prieskumu a ochrany podzemných vôd. Rozvíjala metódy skúmania kvantitatívnych a kvalitatívnych vlastností prírodných vôd, modelovania a prognózovania. Na riešenie výskumných úloh boli využívané moderné metódy hydrogeologického a hydrogeochemického modelovania a GIS. Nosnými témami projektov bolo antropogénne znečistenie v urbanizovaných oblastiach, formovanie krasových vôd v jaskynných systémoch, modelovanie prúdenia podzemných vôd v oblasti Bratislavy, nové metódy prieskumu pre tepelné čerpadlá typu voda-voda.

Na katedre pôsobili ako profesori – prof. RNDr. Ladislav Melioris, DrSc., prof. RNDr. Igor Mucha, DrSc., prof. RNDr. Zlatica Ženišová, PhD. a prof. RNDr. Miriam Fendeková, CSc. Z ostatných učiteľov, ktorí sa zaslúžili o rozvoj hydrogeológie, je potrebné spomenúť doc. RNDr. Vavrinca Böhma, CSc., Ing. Kvetoslavu Hyánkovú, CSc. a doc. RNDr. Petra Némethyho, CSc. Funkciu vedúceho katedry vykonávali prof. Ladislav Melioris, DrSc. (1977 – 1981), prof. RNDr. Igor Mucha, DrSc. (1981 – 1990), RNDr. Ladislav Škvarka, CSc. (1990 – 1992), prof. RNDr. Miriam Fendeková, CSc. (1993 – 2002, 2013 – 2017), prof. RNDr. Zlatica Ženišová, PhD. (2002 – 2013) a doc. RNDr. Renáta Fľaková, PhD. (2017 – 2020). Napriek tomu, že potreba hydrogeológov na trhu práce je aj dnes, činnosť katedry bola ukončená k 31. 12. 2020 a katedra sa stala oddelením v rámci novej Katedry inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky.

3. Náročné obdobie posledných desaťročí

Po spoločenských i hospodárskych zmenách v roku 1989 začalo upadať povedomie verejnosti o význame geológie v spoločnosti, čo sa postupne odrazilo i v príprave špecialistov jednotlivých geologických odborov.

V roku 2005 bola uskutočnená reštrukturalizácia fakulty, začal nový spôsob financovania jednotlivých pracovísk Prírodovedeckej fakulty na základe výkonov pracoviska (katedry) vo výskume a pedagogike. Od tohto obdobia sa postupne začal znižovať počet vysokoškolských a technických pracovníkov oboch katedier na súčasný hlboko poddimenzovaný stav.

Vysoké školy poskytujú vysokoškolské vzdelávanie v rámci akreditovaných študijných programov. Študijné programy sa uskutočňujú v troch stupňoch: 1. stupeň – bakalársky študijný program (3 roky), 2. stupeň – magisterské študijné programy (2 roky) a 3. stupeň – doktorandský študijný program (súčasné interné štúdium trvá 4 roky). Toto rozdelenie štúdia na stupne si vyžiadalo dosť radikálne zásahy do obsahu učebných plánov a ovplyvnilo prípravu absolventov. Príprava našich absolventov bola rozdelená na trojročnú prípravu v bakalárskom stupni v odbore geológia a dvojročné štúdium v magisterskom stupni v odbore inžinierska geológia a hydrogeológia. Každý stupeň štúdia je ukončovaný štátnymi záverečnými skúškami, v rámci ktorých študenti obhajujú svoju postupovú prácu – bakalársku alebo diplomovú. Dva roky špecializácie, ktoré poskytovalo magisterské štúdium, neboli dostatočné na kvalitnú prípravu odborníkov pre prax. Nutne sa museli upraviť študijné plány a obsah predmetov redukovať.

Prví bakalári v odbore Geológia so zameraním na inžiniersku geológiu, hydrogeológiu alebo environmentálnu geológiu obhájili svoje bakalárske práce v roku 2005 (tab. 1 a tab. 2).

Magisterské štúdium bolo od školského roku 2002/2003 poskytované v dvoch študijných programoch: inžinierska geológia a hydrogeológia a aj environmentálna geológia (so zameraním na hydrogeológiu, inžiniersku geológiu alebo ložiskovú geológiu), o zavedenie ktorej sa výrazne zaslúžil doc. M. Hrašna. Počty obhájených diplomových prác v jednotlivých študijných programoch sú podľa rokov rozpísané v tab. 1 a v tab. 2. V uvedených tabuľkách sú zosumarizované aj počty obhájených dizertačných a rigoróznych prác.

Tab. 1 Počty obhájených postupových prác na Katedre inžinierskej geológie od roku 2003 po súčasnosť
Tab. 1 Number of graduate theses at the Department of Engineering Geology from 2003 to the present

	Bakalárske práce	Diplomové práce		Dizertačné práce	Rigorózne práce	Habilitačné konania	Inauguračné konanie
2003	**-**	**17**		**1**	**1**		
2004	**-**	**14 + 5 EG**		**2**	**-**		
2005	**9**	**6 + 3 EG**		**3**	**1**		
2006	**16**	**8 + 5 EG**		**-**	**-**		
2007	**8**	**8**		**2**	**-**		
2008	**0**	**12 + 3 EG**		**2**	**2**		
2009	**4**	**7**		**-**	**1**		
2010	**6**	**1**		**4**	**-**		
2011	**3**	**6**		**1**	**-**	**R. Adamcová M. Bednarik**	
2012	**2**	**6**		**2**	**-**		
2013	**3**	**2**		**1**	**1**	**V. Greif**	
2014	**1**	**4**		**1**	**-**		
2015	**6**	**5**		**-**	**1**		
2016	**4**	**1**		**1**	**-**		
2017	**4**	**3**		**-**	**-**		
2018	**0**	**4**		**2**	**1**		
2019	**2**	**3**		**1**	**5**		
2020	**1**	**1**		**-**	**1**		
2021	**1**	**0**		**-**	**-**		**M. Bednarik**
2022	**možno 3**	**0**					

4. Súčasný stav výučby a výchovy absolventov

Od 1. 9. 2019 Vyhláškou 244/2019 Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky o sústave študijných odborov Slovenskej republiky bol zavedený nový číselník odborov vo vysokoškolskom vzdelávaní, ktorý priniesol zmeny v názvoch odboroch a študijných programoch. Všetky geologické disciplíny boli spolu s geografiou začlenené do odboru č. 42 Vedy o Zemi, v ktorom možno uskutočňovať tie študijné programy, pre ktoré vysoká škola získa akreditáciu.

Aktuálne prebiehajúca akreditácia vyplývajúca zo Zákona č. 269/2018 o zabezpečovaní kvality vysokoškolského vzdelávania a o zmene a doplnení zákona č. 343/2015 Z. z. o verejnom obstarávaní a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov 269/2018 účinný od 01. 01. 2022, prinesie ďalšie, nie veľmi priaznivé zmeny vo výchove absolventov inžinierskej geológie a hydrogeológie. Okrem zmeny názvu odboru v bc. stupni (študijný odbor Geológia nahradil odbor Vedy o Zemi, názov Geológia ostal ako názov študijného programu), inžinierskogeologické a hydrogeologické predmety boli výrazne zredukované (aj počtom hodín, aj počtom kreditov), čo bude znamenať, že bakalár bude menej pripravený na magisterské štúdium v našom študijnom programe inžinierska geológia

a hydrogeológia, ako to bolo doteraz. Úpravy štúdia na bc. stupni si následne vyžiadali zmeny v učebných plánoch študijných predmetoch na magisterskom stupni.

Pozitívna zmena nastala na doktorandskom stupni štúdia, v ktorom podobne ako je to zavedené dlhoročne v magisterskom stupni, bol v minulom roku akreditovaný študijný program s názvom Inžinierska geológia a hydrogeológia. Takto zjednotený program garantuje pätica učiteľov z oboch odborov – 1 VŠ profesor (M. Bednarik) a 4 VŠ docenti (R. Adamcová, V. Greif, R. Fľaková a D. Krčmář). Doktorandský študijný program získal výborné hodnotenie a bol vysoko ocenený členmi Akreditačnej komisie. Hodnotenie študijného programu na magisterskom stupni ešte nie je akreditačnou komisiou ukončené.

Nepriaznivý demografický vývoj, možnosti štúdia v zahraničí, najmä podpora vysokoškolského štúdia na českých vysokých školách, otváranie geologických študijných programov na ďalších vysokých školách na Slovensku – toto všetko v poslednom desaťročí viedlo medzi stredoškolákmi k výraznému poklesu záujmu o štúdium inžinierskej geológie a hydrogeológie v domácom prostredí a kauzálne k výraznej personálnej redukcii na katedrách IG ako aj HG (cca 5 vysokoškolských pracovníkov a sekretárka). Znižovanie stavu pracovníkov katedier vyústilo v závere roka 2020 do zlučovania pracovísk na PriF UK v Bratislave. Od 1. 1. 2021 v organizačnej schéme fakulty existuje Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky, ktorej vedúcim sa stal prof. RNDr. Martin Bednarik, PhD.

Tab. 2 Počty obhájených postupových prác na Katedre hydrogeológie od roku 2003 po súčasnosť
Tab. 2 Number of graduate theses at the Department of Hydrogeology from 2003 to the present

	Bakalárske práce	Diplomové práce	Dizertačné práce	Rigorózne práce	Habilitačné konania	Inauguračné konanie
2003	**-**	**14**	**3**	**4**		
2004	**-**	**10 + 11 EG**	**3**	**2**		
2005	**5**	**12 + 3 EG**	**1**	**0**		
2006	**11**	**8 + 4 EG**	**1**	**5**		
2007	**6**	**4 + 6 EG**	**3**	**2**		
2008	**5**	**7 + 3 EG**	**2**	**1**	**M. Fendek**	
2009	**7**	**3 + 2 EG**	**2**	**3**		
2010	**6**	**3 + 7 EG**	**4**	**0**		**M. Fendeková**
2011	**4**	**7**	**2**	**4**	**R. Fľaková**	
2012	**4**	**6**	**1**	**1**	**D. Krčmář**	
2013	**1**	**4**	**2**	**1**		
2014	**2**	**8**	**1**	**0**		**Z. Ženišová**
2015	**3**	**1**	**4**	**1**		
2016	**5**	**0**	**2**	**0**		
2017	**0**	**6**	**2**	**0**		
2018	**0**	**5**	**0**	**0**		
2019	**3**	**0**	**0**	**0**		
2020	**1**	**0**	**0**	**1**		
2021	**0**	**2**	**4**	**3**		
2022	**0**	**možno 2**	**-**	**-**		

5. Záver

Za posledných 20 rokov, t. j. od roku 2003 ukončilo štúdium inžinierskej geológie a hydrogeológie zabezpečované Katedrou inžinierskej geológie a Katedrou hydrogeológie na bakalárskom stupni 134 absolventov a na magisterskom stupni 232 absolventov. Obe katedry úspešne vyškolili 61 doktorandov v internej alebo externej forme štúdia a 42 uchádzačov získalo titul RNDr.

Najmä posledné dve desaťročia v nastavených konkurenčných podmienkach svojej fakulty majú aplikované geologické disciplíny výrazne sťažené podmienky na existenciu, čo sa odráža vo výraznom poklese pracovníkov katedier poskytujúcich tento študijný program a v stagnácii smerujúcej k zániku tohto študijného programu na UK. Nepriaznivý stav súvisí s celkovým vytesňovaním geológie v spoločnosti, vo výraznom poklese študentov a v nastavení financovania fakultných pracovísk podľa výkonov vo výučbe a vo výskume. Napriek tomu, katedra stále ako jediná na Slovensku produkuje absolventov inžinierskej geológie a hydrogeológie, ktorých začína byť v praxi výrazný nedostatok.

Zabezpečiť vysokú kvalitu poskytovaného štúdia s nedostatočným počtom odborníkov sa stáva dlhodobo neudržateľné. Zvýšené nároky spoločnosti, potreba prepájania výučby s praxou, pribúdanie poznatkov i metód výskumu či prieskumu, rýchly vývoj odborov vo svete, inovácie v praxi, informatizácia a internacionalizácia štúdia – všetko toto si vyžaduje podstatne vyššie zastúpenie učiteľov i výskumných pracovníkov v oboch odboroch.

Zoznam literatúry

Matula, M., 2014: Ako sa naša inžinierska geológia stala vedeckou disciplínou. Acta Geologica Slovaca, 6, 1, s. 3 – 12.

Matula, M., Ondrášik, R., Hrašna, M., Holzer, R., Melioris, L., Mucha, I., Fendeková, M., Hyánková, A., Durmeková ,T., 2002: Pol storočia inžinierskej geológie a hydrogeológie na Univerzite Komenského. – Bratislava: Univerzita Komenského, 126 s.

Fľaková, R., Krčmář, D., Fendeková, M., Ženišová, Z., 2018: Štúdium hydrogeológie v rámci geologického vzdelávania na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave. In: *Zborník z 19. slovenskej hydrogeologickej konferencie "Hydrogeológia - vzdelávanie, veda a prax", Kúpele Nimnica, 6.11. – 9.11.2018*. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov, s. 1 – 11.

Fľaková, R., Krčmář, D., Fendeková, M., Ženišová ,Z., 2017: 40 rokov Katedry hydrogeológie na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave. Podzemná voda, 23, 2, s. 137 – 182.

SISGEO®

Profesionální přístroje pro geotechnický monitoring

EkoTechnika

Výhradní zastoupení pro SR

www.ekotechnika.cz

Portály tunelov Svrčinovec a Poľana zo systému Terramesh®

Soil refinforcement vystuženej horninovej konštrukcie so zeleným lícom Green Terramesh®, aplikovaný na strmých svahoch diaľnice D3

Sanácia svahov pomocou Dynamických bariér Mac.RO

Oporné múry zo systému MacRes® s betónovým lícom

MACCAFERRI

Engineering a Better Solution

Kontaktuje nás:
Obchodno – technická kancelária Bratislava:
Kopčianska 15, 851 01 Bratislava
Tel.: +421 2 20 24 00 56

info.sk@maccaferri.com

www.maccaferri.com/sk

Ďalšie naše riešenia

- *Protierózne opatrenia*
- *Zlepšovanie podložia a vystužovanie vozoviek*
- *Úprava vodných tokov*
- *Vystužovanie podložia násypov*
- *Bezpečnostné a protihlukové bariéry*
- *Životné prostredie, odvodňovanie segmentov a skládky*