

KORELÁCIA VÝSLEDKOV GEOTECHNICKÉHO PRIESKUM A GEOFYZIKÁLNYCH MERANÍ

CORRELATION OF RESULTS OF GEOTECHNICAL SURVEY AND GEOPHYSICAL MEASUREMENTS

Renáta Mikušová, Lubomír Gašparek

Abstrakt:

V súčasnosti sa mnoho priehrad na Slovensku dožíva 50 – 60 rokov a ich starnutie má veľký vplyv na bezpečnú prevádzku. Bezpečnosť hrádzi si vyžaduje dlhodobé a časovo kontinuálne monitorovanie. Merania vykonávané na zabudovaných merných zariadeniach môžu naznačiť nepriaznivý vývoj, prípadne vznik porúch, no väčšinou nevedia poskytnúť informáciu o príčine vzniku poruchy. Preto niektoré metódy môžu byť vhodnejšie pri prieskume, resp. zisťovaní príčin vzniku porúch, než pri samotnom monitorovaní. Využívanie konvenčných metód geotechnického prieskumu si často vyžaduje invazívny zásah do vnútornej konštrukcie telesa hrádze a väčšinou poskytuje užitočné, ale len bodové informácie. Naopak použitie geofyzikálnych metód umožňuje skúmať vnútornú štruktúru hrádzi bez jej narušenia a výsledky poskytujú informácie väčšieho objemu – komplexnejší pohľad na vnútornú štruktúru vodnej stavby. Príspevok prezentuje a vzájomne porovnáva výsledky geotechnického a geofyzikálneho prieskumu na vybraných vodných stavbách.

Kľúčové slová: odkalisko, sufózia, merný elektrický odpor.

Abstract:

Nowadays, many dams in Slovakia are celebrating 50-60 years of their existence and their aging has an impact on safety. Dam safety management requires long-term and time-continuous monitoring. Measurements performed by using installed equipment may indicate negative process inside the structure, but we don't know cause of failure. Therefore, some methods may be more suitable in the survey, respectively for identifying the cause of failure. Traditional inspection methods have some drawbacks, conventional geotechnical investigation methods applied on the water constructions often require invasive actions to the internal structure of the dam and generally provide effective but only punctual information. On the contrary, the application of noninvasive geophysical techniques makes it possible to investigate higher volumes without affecting the structure. This paper presents and compares the results of geotechnical and geophysical survey of selected water constructions.

Key words: tailing dam, internal erosion, electrical resistivity.

1. ÚVOD

Cieľom monitoringu priehrad a hrádzi je získať základné informácie o ich stave a bezpečnosti. Klasický monitoring hrádzi odkalísk sa sústreďuje predovšetkým na sledovanie hladinového režimu, meranie priesakov (priesakové a drenážne množstvá, resp. ich čistota, zákal) a meranie pohybov a deformácií. Jedná sa hlavne o bodové merania. Týmito meraniami väčšinou nie je možné odhaliť malé lokálne zmeny, ako je napríklad sufózia, prípadne vytváranie preferovaných ciest prúdenia. Takéto zmeny sú väčšinou spozorované až pri vonkajších prejavoch, napr. výver alebo prepadnutie terénu.

Sufózia je jednou z hlavných príčin porúch sypaných hrádzi. Ide o proces, kedy sú jemné čiastočky z vnútra hrádze odnášané prúdom presakujúcej vody. S narastajúcou filtračnou rýchlosťou sa môže proces odnášania jemných čiastočiek urýchliť a pri prekročení kritických rýchlostí môže dôjsť k poruche hrádze. Doba trvania procesu od začiatku zvýšeného priesaku až k poruche hrádze sa môže značne líšiť, od niekoľkých hodín až niekoľko rokov. Niekedy sa môže proces sám zastaviť. V každom prípade je dôležité odhaliť takýto proces ešte na začiatku vzniku, skôr než začne mať vplyv na bezpečnosť hrádze.

Vývoj geofyzikálnych metód v priebehu posledného desaťročia zvýšil používanie týchto metód aj pri prieskume a monitorovaní sypaných hrádzi, hlavne pri detekcii možných priesakov cez teleso hrádze. Aplikácia geofyzikálnych metód umožňuje skúmať vnútornú štruktúru hrádzi bez jej narušenia a výsledky poskytujú informácie väčšieho objemu – komplexnejší pohľad na vnútornú štruktúru vodnej stavby. Naproti tomu klasické metódy geotechnického prieskumu poskytujú veľmi užitočné, ale len bodové informácie a vyžadujú si často invazívny zásah do vnútornej konštrukcie telesa hrádze.

Jednou z geofyzikálnych metód, ktoré sa osvedčili pri kontrole homogenity zemných sypaných hrádzi je multielektródové profilovanie. Prítomnosť nehomogenít v telese hrádze môže naznačovať sufóznú činnosť, t.j. odplavovanie jemného materiálu a tým vytváranie preferovaných ciest prúdenia podzemnej vody. Príspevok hodnotí výsledky geofyzikálneho prieskumu na lokalite odkalisko Martin staré, kde na základe výsledkov geofyzikálneho merania bol následne vykonaný aj geotechnický prieskum (vrtné a laboratórne práce).

2. METÓDA MULTIELEKTRÓDOVÉHO PROFILOVANIA

Metóda multielektródového profilovania (MEP) slúži na meranie hĺbkových rezov merného odporu v sledovanom prostredí. Je vhodná pre detailný prieskum vertikálne aj horizontálne smerovaných nehomogenít a vyhľadávanie objektov s odlišným merným odporom. Metóda sa využíva pre zostavovanie geologických rezov, mapovanie puklín, dutín a zlomov, vyhľadávanie priesakov, prieskum svahových deformácií atď. Môže byť realizovaná ako 2-D alebo 3-D meranie.

Cieľom geoelektrického prieskumu je stanoviť podpovrchové rozloženie zdanlivého merného odporu pomocou povrchových meraní. Z týchto meraní môže byť odhadnutý skutočný odpor. Merania rezistivity sú bežne robené zavedením prúdu I do zeme cez 2 prúdové elektródy (C1 a C2) a meraním výsledného rozdielu napätia U na 2 potenciálových elektródach (P1 a P2). Z hodnôt prúdu a napätia sa vypočíta hodnota zdanlivého merného odporu. Vypočítaný odpor nie je skutočný odpor zeme, ale zdanlivý odpor homogénnej zeme, ktorá by mala rovnaké hodnoty odporu pre rovnaké rozostupy elektród. Pri meraní v teréne sa však prakticky s homogénnym prostredím nestretávame. Vypočítaný merný odpor je ovplyvnený rozdielom v odporoch geologických objektov, ich tvarom, usporiadaním elektród, morfológiou terénu a ďalšími faktormi, preto hovoríme o zdanlivom mernom odpore prostredia. Skutočný odpor prostredia sa následne počíta pomocou obrátenej úlohy.

Na interpretáciu odporového obrazu na geologický je dôležité poznať typické hodnoty odporov pre rozdielne typy materiálov, ako aj geológiu skúmaného prostredia. Odporové vlastnosti jednotlivých hornín a zemín sú do značnej miery závislé od stupňa rozpukania, pórovitosti, percenta nasýtenia vodou a koncentrácie rozpustených solí. Sedimenty sú zväčša

viac porézne a majú vyšší obsah vody a teda vyznačujú sa nižšími hodnotami odporu. Vlhké pôdy a podzemná voda majú ešte nižšie hodnoty odporu (10 až 100 Ω m).

Pre potreby geofyzikálnych meraní metódou MEP používame aparatúru ARES G-400, ktorá využíva multikáblový systém s variabilným systémom elektród. Aparatúra je schopná počas merania prepínať geometriu merania (meniť polohu prúdových a potenciálových elektród), čím zabezpečuje schopnosť zamerať všetky dostupné kombinácie meraných bodov pod profilom. Výsledkom meraní je vertikálny odporový rez s variabilným počtom hladín merania.

Čím väčšia je hustota uzemňovacích bodov na profile, tým hustejšia je informácia o mernom odpore prostredia vo vertikálnom reze. Hĺbkový dosah metódy je daný usporiadaním a počtom elektród v základnom postavení multikábla.

Namerané dáta sú spracovávané do formy odporových pseudorezov pomocou programu Res2DInv.

3. VÝSLEDKY PRIESKUMU NA LOKATILE ODKALISKO MARTIN STARÉ

Povrchové geofyzikálne merania na lokalite Odkalisko Martin staré boli realizované v 3 etapách - 06/2008, 09/2008 a 10/2009. Metódou multielektrodového profilovania bolo na starom odkalisku preverených niekoľko vytypovaných úsekov (11 meraných profilov MTS1 až MTS11). V článku sa venujeme len profilom, ktoré boli situované v pravej časti hrádze, v miestach deformačných porúch (kaverien) a predpokladaného križovania priesakovej dráhy, teda profilom MTS5 až MTS11. Situovanie a orientovanie jednotlivých profilov je na obr.1.



Obr.1: Situácia

Na základe odporových charakteristík meraného prostredia boli zhotovené vertikálny odporové rezy prostredím, ktoré boli následne interpretované.

Profily MTS5 a MTS6:

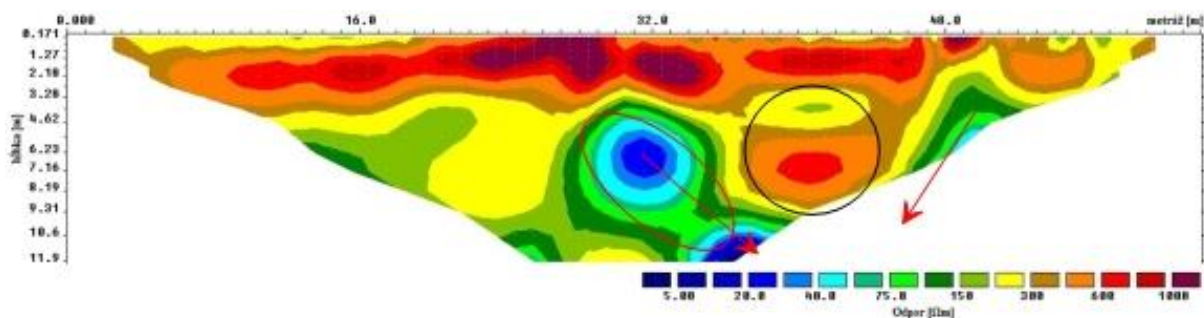
Situovanie profilov MTS5 a MTS6 (koruna hrádze I/5) bolo v dôsledku prepادلiny, ktorá vznikla na tom istom mieste medzi vrtmi HJ-1 a HJ-2/A najprv v 05/2005 (obr.2 vľavo) a neskôr v 03/2008 (obr.2 vpravo).



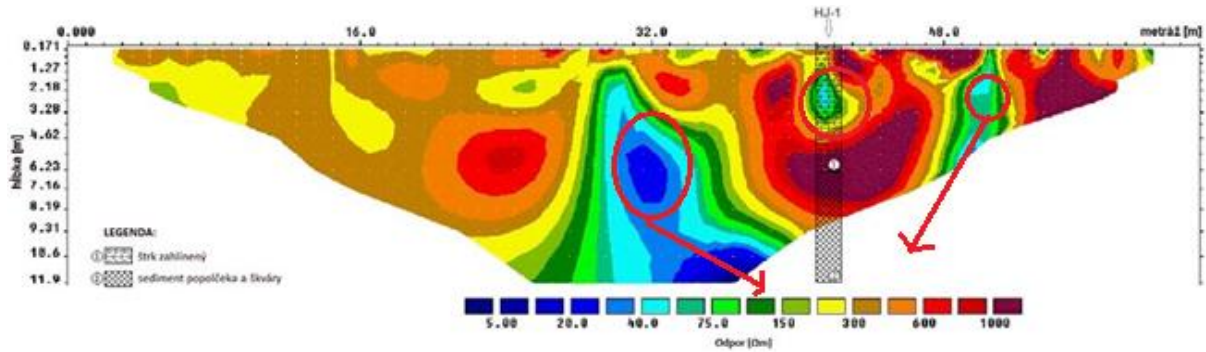
Obr.2: Prepادلina medzi vrtmi HJ-1 a HJ-2/A, vľavo foto z 5/2005, vpravo foto z 3/2008 (foto: Ing. El'ková)

Prepادلina je filtračného charakteru, ktorá má zrejme súvis s vyplavovaním popola z vodorovného vrtu VV-8 v marci 2004 pri jeho zhavarovaní, kedy sa týmto vrtom vyplavilo značné množstvo popola, čím sa mohla vo vyšších partiách hrádze vytvoriť kaverna. Rovnako na filtračných poruchách mohla mať podiel hladina vody z naplavovania hydrozmesi v blízkosti čelnej hrádze a zdržovanie sa vody tesne pri obvodovej hrádzi. Pokiaľ pri naplavovaní voda neodteká plynulo k prepadovému objektu, ale zdržiava sa pri hrádzi, má to za následok zvýšenie hydraulického spádu a filtračných rýchlostí a následný vznik filtračných porúch.

Miesto prepادلiny zodpovedá staničeniu 30 m profilu MTS6. Krok merania na oboch profiloch MTS5 a MTS6 bol 2 m a dĺžka každého profilu bola 62 m. Pripovrchová vrstva (max. do hĺbky 0,5 m) je veľmi rôznorodá, prejavujúca sa odpormi od 100 až po 1000 Ωm . Pod touto vrstvou sa do hĺbok 6 – 7 m nachádzajú zahlinené štrky s vyššími odpormi (až do 1000 Ωm). Štrky sú suché, v čase merania bola HPV vo vrte HJ-1 14,2 m od terénu. Pod štrkami je uložený sediment popolčeka a škváry.



Obr.3: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS5



Obr.4: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS6

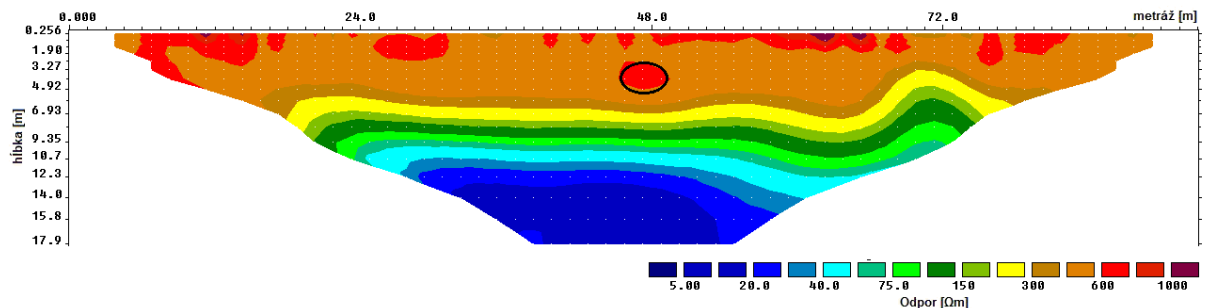
V staničení 41 – 42 m a hĺbke 2 m sa nachádza menšia anomália s nižšími odpormi voči okoliu. V mieste situovania vrtov HJ-1/A a HJ-2/A prechádza staré potrubie. Podľa záberov z videomonitoringu starého prepádového potrubia je potrubie pravdepodobne práve v tejto oblasti prerazené oceľovou pažnicou a v tomto mieste dochádza aj k pretekaniu podzemnej vody. Jeho predpokladaná hĺbka uloženia je okolo 17 m. K danému potrubiu sa ťahá rozsiahla anomália nízkych odporov (z ľavej strany od metráže 31 m a hĺbky okolo 5m, z pravej strany od metráže 50,5 m a hĺbky 2 m (MTS6), prípadne 6m (MTS5) – označená červenými šípkami. Pravdepodobne sa jedná o preferovanú cestu prúdenia podzemnej vody a naznačuje na silný drenážny účinok starého prepádového potrubia.



Obr.5: Prerazené potrubie oceľovou pažnicou

Profil MTS7:

Profil bol situovaný na korune 4. nadvyšovacej hrádze. Na výslednom odporovom modeli pod profilom MTS7 možno sledovať rovnomerné rozloženie odporov pozdĺž celej dĺžky. Vysoké odpory pri povrchu (okolo 500 Ω m) odpovedajú vodou nenasýtenou zónou tvorenou hliníťm štrkom. Ide o teleso hrádze. Pod nimi sa nachádza sediment popolčeka prejavujúci sa nižšími odpormi. V danom profile bola zaznamenaná menšia anomália v staničení 45,0 - 49,5 m a hĺbke 3 - 5 m.



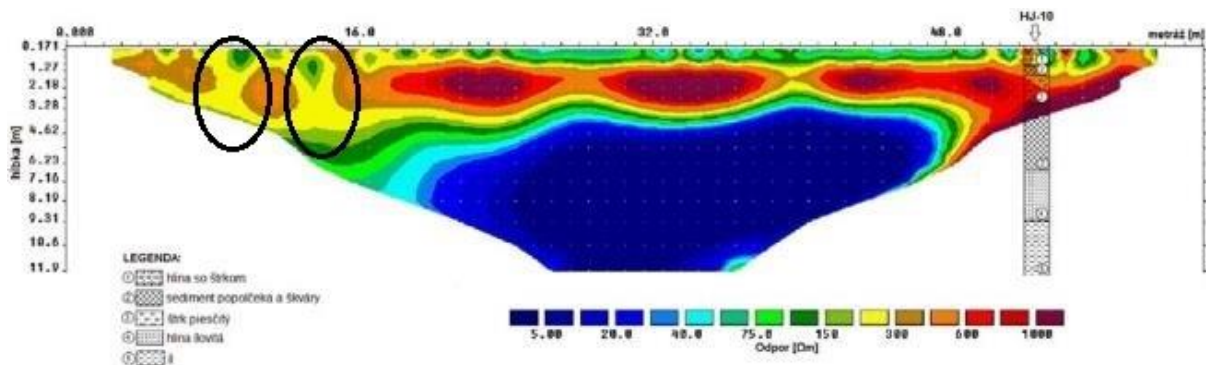
Obr.6: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS7

V blízkosti meraného profilu MTS7 sa nachádza sonda JC-4/1, v ktorej bola počas hĺbenia zdokumentovaná kaverna v hĺbke 2,0 - 4,5 m. Na jej dne bol voľným okom pozorovateľný silný prúd priesakovej vody.

Profily MTS8, MTS9, MTS10, MTS11:

Profil MTS8 bol situovaný nad poruchou na korune 3. nadvyšovacej hrádze (prepadlina pri HM-9 z 04/2005). Rozostup merných elektród bol 2 m a dĺžka celého profilu 62 m. Profil MTS9 bol situovaný v línii nad existujúcou poruchou (kráter medzi šachtami ŠD-1 a ŠD-2). Staničenie profilu 30 m zodpovedá umiestneniu stredu miesta prepaddinly. Na profile boli rozmiestnené merné elektródy s krokom 2 m a v dĺžke 62 m. Profily MTS10 a MTS11 boli realizované priečne na teleso hrádze (kolmo na profily MTS8 a MTS9). Začiatok profilov je situovaný na lavici prísypu základnej hrádze a koniec profilov na korune hrádze I/4.

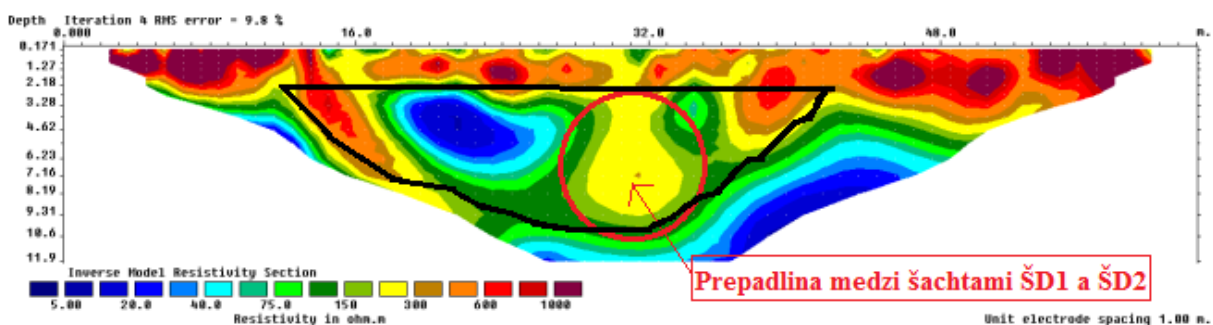
Povrchovú vrstvu profilu MTS8 do hĺbky asi 0,5 m tvorí hlina so štrkom s odporom 50 – 150 Ωm . Vyššie odpory (nad 500 Ωm) v hĺbke 0,5 – 3,5 m sú prejavom samotného telesa hrádze, ktoré je tvorené zahlineným štrkom. Pod násypom hrádze sa nachádza naplavený popolček, ktorý je pod úrovňou HPV (odporový prejav 5 – 20 Ωm). Anomálie boli zistené v oblasti násypu telesa hrádze v staničeniach 8 – 10 m a 12 – 14 m, pravdepodobne zasypané kaverny.



Obr.7: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS8

Na vertikálnom reze profilu MTS9 možno sledovať pripovrchovú vrstvu s hrúbkou do 2,5 m tvorenú zahlinenými štrkami (násyp telesa hrádze), ktorá sa vyznačuje vyššími mernými odpormi (500 - 1000 Ωm). Pod povrchovou vrstvou je lokalizovaná vrstva, charakterizovaná mernými odpormi od 25 do 100 Ωm , ktorá pravdepodobne predstavuje pôvodný plavený materiál s vyšším obsahom vody.

V hĺbke 4,0 – 9,0 m sú lokalizované anomálne štruktúry prostredia. V staničení 28 – 33 m je anomália spôsobená zavalením kaverny, v staničení 19 – 25 m sa pravdepodobne vytvára nová preferovaná cesta prúdenia. Z pohľadu TBD sa jedná o veľkú anomálnu oblasť ohraničenú v obrázku MTS9 čiernou čiarou. Červenou farbou je vyznačené miesto prepaddinly, ktorá vznikla nad drenážnym úsekom drénu I/3 medzi šachtami ŠD-1 a ŠD-2 v 06/2008.



Obr.8: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS9

V tesnej blízkosti prepadliny bol v 11/2011 vykonaný geotechnický prieskum – odvrtanie 1 ks pozorovacieho vrtu (sonda S-10) s odberom vzoriek a ich následným laboratórnym posúdením. Pri vrtaní boli zistené nasledovné vrstvy zemín: 0,00 - 0,10 m hlina, 0,10 - 1,00 m antropogénne sedimenty (zmes piesku a štrku), 1,00 - 1,40 m antropogénne sedimenty (tvorené pieskom a popolčekom), 1,40 - 1,50 m antropogénne sedimenty (betón), 1,50 - 1,80 m dutina, 1,80-4,40 m antropogénne sedimenty (tvorené piesčitým štrkom), 4,40-6,00 m antropogénne sedimenty (tvorené popolčekom).

Vzorky boli odobrané z hĺbkovej úrovne 0,5 - 0,7 m (vzorka č.1), 1,2 - 1,4 m (vzorka č.2), 2,6 - 2,8 m (vzorka č.3), 3,5 - 3,7 m (vzorka č.4), 4,5 - 4,7 m (vzorka č.5), 5,5 - 5,7 m (vzorka č.6). Z laboratórných skúšok boli určené nasledovné geotechnické charakteristiky – prirodzená vlhkosť w , objemová hmotnosť ρ_s , objemová hmotnosť – saturovaná ρ_n , objemová hmotnosť – suchá ρ_d , koeficient pórovitosti e , pórovitosť n , saturácia S_r , kohézia c , uhol vnútorného trenia φ , relatívna stlačiteľnosť ε , oedometrický modul E_s , koeficient nerovnomernosti C_U , obsah ílu-hliny tartalom $S_{0,063}$, hmotnosť frakcií (štrk, piesok, hlina, íl) a koeficient priepustnosti k . Výsledky laboratórných skúšok sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka č.1: Výsledky laboratórných skúšok [1]

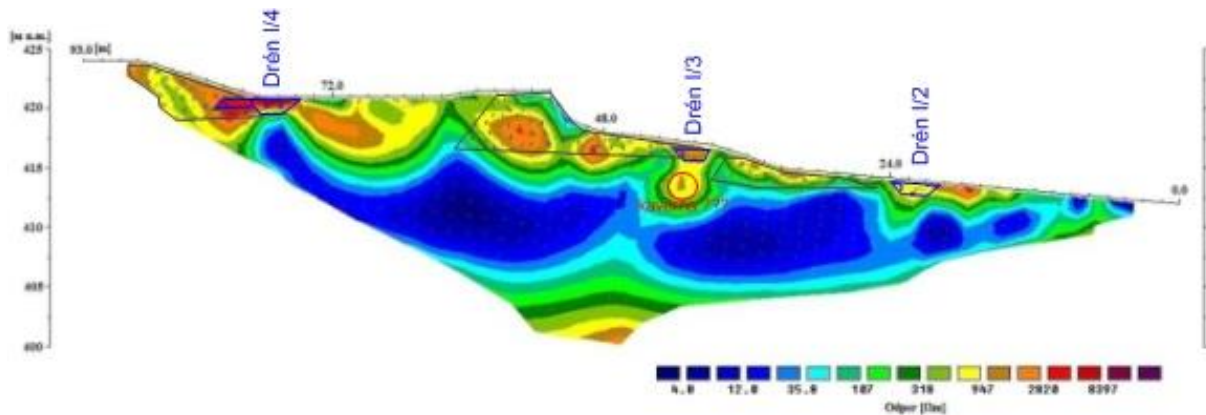
fyzikálne parametre		číslo vzorky / hĺbka odberu					
symbol	jednotka	1 (0,5-0,7 m)	2 (1,2-1,4 m)	3 (2,6-2,8 m)	4 (3,5-3,7 m)	5 (4,5-4,7 m)	6 (5,5-5,7 m)
w	%	5,58	15,14	11,81	12,49	39,76	67,67
ρ_s	g/cm ³	2520	2340	2630	2650	2120	2140
ρ_n	kN/m ³	1755	1321	2258	2284	1654	1555
ρ_d	kN/m ³	1662	1147	2019	2031	1184	927
e		0,52	1,04	0,30	0,31	0,79	1,31
n	%	34,2	51,0	23,1	23,7	44,1	57,0
S_r		0,25	0,38	1,0	1,0	1,0	1,1*
c	kN/m ²	11,9	4,0	30,6	18,5	10,4	5,0
φ	°	12	13	12	8	13	29
ε	%	2,9	10,3	3,5	4,8	2,3	3,6
E_s	MN/m ²	10,75	2,51	8,93	8,47	11,6	9,43
C_U		125,0	147,7	68,2	150,0	47,1	5,2
$S_{0,063}$	%	11,5	14,0	8,5	16,5	29,5	83,0
štrk	%	62,5	49,0	56,0	45,0	23,5	0
piesok	%	26,0	37,0	35,5	38,5	47,0	17,0
hlina	%	11,0	13,5	8,0	15,0	29,0	79,5
íl	%	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	3,5
k	cm/s	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$

*Pozn.: presýtená vzorka

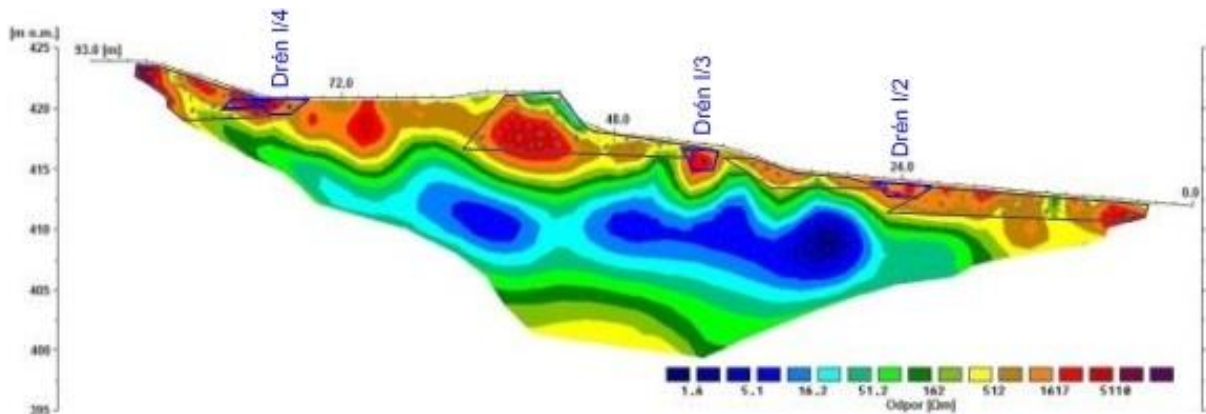
V závere elaborátu z geotechnického prieskumu [1] je konštatované, že na základe vrtania a výsledkov laboratórných skúšok nie je možné určiť konkrétne príčiny vzniku prepadliny v tesnej blízkosti vrtu S-10 ale predpokladá sa, že dutiny vzniknuté vo vrstve popolu (škvara + popolček) pod telesom hrádze sa vytvárali počas viacerých rokov odplavovaním jemnejšej frakcie popolčeka. Vzniknuté dutinky sa jedna po druhej, postupujú smerom nahor zavalila. Keď sa dutina dostane do blízkosti terénu, následkom premočenia povrchovej vrstvy (topenie snehu, intenzívne zrážky) sa na povrchu vytvorí kráter.

Priečne profily MTS10 a MTS11 majú takmer rovnaké odporové prejavy. Rozdiely sú len na začiatku profilu – lavica prísypu. Kým na profile MTS10 sú nízke odpory (10 – 200 Ω m) prislúchajúce ilovito-piesčitým zeminám, na profile MTS11 sú odpory vyššie (300 – 1500 Ω m) a jedná sa skôr o štrkovitý materiál. Na oboch profiloch možno jasne sledovať štruktúru

stavbu odkaliska v priečnom reze s charakteristickým striedaním systému nadvyšovacích hrádzi a jednotlivých úrovňových drenáží. Na profile MTS10 je pod drénom I/3 červenou farbou zvýraznená anomália súvisiaca s prepadlinou, ktorá sa objavila medzi šachtami ŠD1 a ŠD2.



Obr.9: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS10



Obr.10: Vertikálny odporový model prostredia pod profilom MTS11

Pravá strana hrádze (v smere toku) bola najrizikovejšou časťou celého hrádzového systému aj v minulosti. Akú úlohu v tom hrajú preferované zóny prúdenia momentálne nie je možné jednoznačne stanoviť, avšak jav pozorovaný v kaverne zdokumentovanej sondou JC-4/1 poukazuje na skutočnosť, že pri nesprávnom spôsobe plavenia, dochádza k sufózii jemných frakcií popola, ktoré buď vyplňajú priestor medzi zrnami hrubých frakcií (napr. škvara), alebo sa dlhodobým kontinuálnym vyplavovaním vcelku malého množstva materiálu vytvárajú kaverny [2].

4. ZÁVER

Príspevok porovnáva výsledky geofyzikálneho prieskumu a geotechnického prieskumu na lokalite odkaliska Martin staré. Vzhľadom na poruchy, ktoré sa počas existencie odkaliska vyskytli jednoznačne naznačujú prítomnosť problémov filtračného charakteru a môžu viesť až k poruche časti čelnej hrádze odkaliska. Z hľadiska technicko-bezpečnostného dohľadu preto považujeme za veľký prínos zmenu spôsobu plavenia hydrozmesi do troch naplavovacích

kaziet situovaných pozdĺž ľavostrannej hrádze, ktorý vlastník odkaliska vykonáva od roku 2011.

Záverom môžeme konštatovať, že pri odhaľovaní filtračných porúch majú veľký prínos geofyzikálne metódy. V priebehu krátkeho času a bez narušenia skúmaného prostredia poskytujú informácie väčšieho objemu – komplexnejší pohľad na vnútornú štruktúru vodnej stavby. V prípade výskytu nejasných anomálií je však nenahraditeľný kvalitný geotechnický prieskum, ktorým môžeme detailnejšie preskúmať anomálne štruktúry.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] ARPÁD M.: *Vrt zn. S-10. Odber vzoriek, laboratórne skúšky a odborný posudok.* Melyépterv-Hidrotranszport Kft., Budapešť, 01/2012. s.7.
- [2] ĎURIANOVÁ D., TUČNÁ R.: *Čiastková správa z výstavby a overovacej prevádzky odkaliska za obdobie rokov 2004 a 2005.* Vodohospodárska výstavba, štátny podnik, Bratislava, 03/2006. s. 76.
- [3] NIKOLAJ M., REMIAŠOVÁ R.: *Odkalisko Martinskej teplárenskej, a.s. Martin "Martin - staré". Správa z geofyzikálnych meraní.* Vodohospodárska výstavba, štátny podnik, Bratislava, 03/ 2010. s. 15.

AUTORI

Mgr. Renáta Mikušová, PhD.

Vodohospodárska výstavba, š.p., Úsek TBD, Nobelova 7, Bratislava 831 02

e-mail: renata.mikusova@vzb.sk

Mgr. Ľubomír Gašparek

Vodohospodárska výstavba, š.p., Úsek TBD, Nobelova 7, Bratislava 831 02

e-mail: lubomir.gasperek@vzb.sk