# Modelovanie dna vodných nádrži za pomoci elektrickej odporovej tomografie

RNDr. René Putiška, PhD., Mgr. Ivan Dostál, PhD., Mgr. David Kušnirák, PhD.,

Zanášanie nádrží sedimentami je z pohľadu vodohospodárskej prevádzky závažným problémom, ktorý začína od uvedenia nádrže do prevádzky. Intenzita zanášania je rôznorodá a sedimenty sú diskontinuálne rozložené na dne nádrže. Aby sme sa vyhli zaneseniu nádrží, je potrebné tieto sedimenty z dna odstrániť. Ťažba sedimentov a ich následný odvoz a uloženie je ale ekonomicky veľmi náročnou činnosťou. Aby bolo možné efektívne sedimenty ťažiť zo dna nádrží, je potrebné mať čo najviac informácií o ich priestorovej distribúcii a hrúbke. Tieto informácie nám veľmi dobre vie poskytnúť geofyzikálna metóda elektrickej odporovej tomografie (ERT) spolu zo zameraním priebehu dna. Metódu ERT je možné v špeciálnej konfigurácii aplikovať na vodnej hladine za účelom zistenia hrúbky sedimentov. Hlavnou výhodou takéhoto merania je veľká hustota dát, ktoré nám umožňuje efektívne 3D spracovanie, vizualizáciu a následný výpočet objemu sedimentov dna vodných nádrží.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: elektrická odporová tomografia, sonár, vodná nádrž, sedimenty

The geophysical electrical tomography method may be applied in a special configuration on the water surface in order to determine the thickness of the sediment and bottom of the lake. The main advantage of such measurements is a great density of data that allows us to efficiently create 3D processing, visualization and subsequent calculation of the volume of the bottom sediments of the lake.

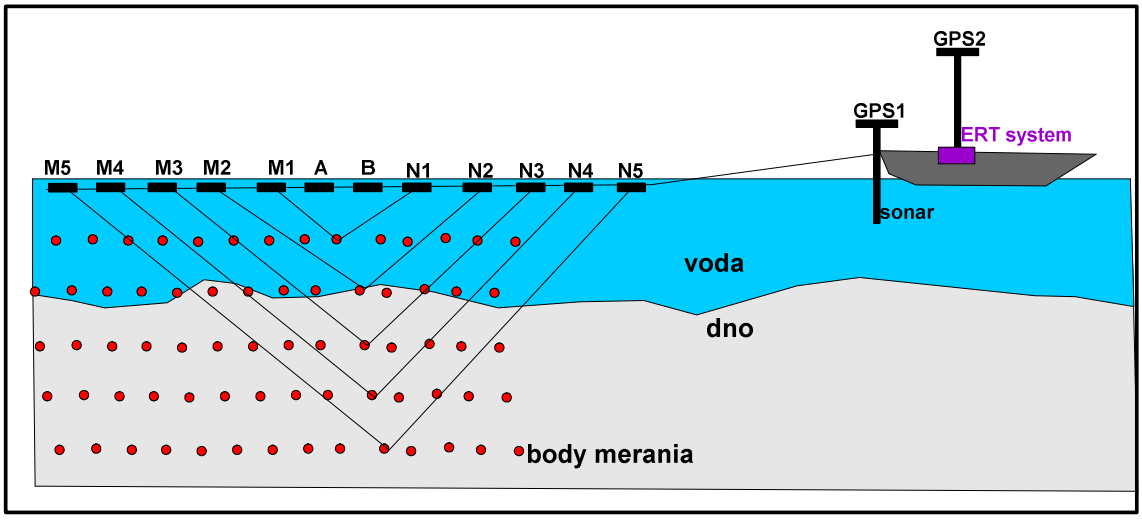
## Úvod

Častým a prirodzeným problémom vodných nádrží je ich zanášanie sedimentami, dôsledkom viacerých procesov ako je erózia, transport a samotné ukladanie sedimentov v nádrži. Všetky tieto procesy významne ovplyvňujú prevádzku a zároveň majú významný vplyv na riečny systém a jeho prostredie (Sočuvka, Velísková, 2014)
Tradičný spôsob určenia objemu dnových sedimentov je analýza zmien reliéfu dna vodných nádrží za určité časové obdobie. Merania môžu byť po technickej stránke vykonané manuálne alebo pomocou akustického zariadenia (sonaru). Celkové množstvo sedimentov v nádrži je možné potom vyjadriť porovnaním aktuálneho priebehu dna s pôvodným dnom vodných nádrži (Kubinský, Weis, 2012, Putiška a kol., 2013), kde sa ale častokrát stretávame s problémom chýbajúcich historických podkladov pôvodného dna vodných nádrží, resp. zamerania vodnej plochy (geodetické a batymetrické údaje).
V súčasnej dobe je možné využívať aj rôzne nové metódy a techniky merania hrúbky dnových sedimentov. Medzi takéto metódy nesporne patria aj geofyzikálne techniky zberu týchto dát, vďaka ktorým je možné rozsiahlejšie riešenie tejto problematiky po kvalitatívnej aj kvantitatívnej stránke.
Elektrické metódy sú vo veľkej miere používané na súši a ich použitie na vode je relatívne nové. Plytké vodné prieskumy sú použitím elektrickej odporovej tomografie čoraz častejšie, hlavne pre množstvo užitočných informácii ktoré nám vedia poskytnúť. Plávajúca verzia elektrickej odporovej tomografie so spojením s presným GPS prijímačom nám umožňuje získať údaje s vysokým rozlíšením. Existujú podstate dva bežné spôsoby merania. V prípade, že dno nádrže nie je hlbšie ako 10-15 m pod hladinou môžeme použiť na meranie merné odporu dna a dnových sedimentov kontinuálne profilovanie použitím motorového člnu. Toto meranie je výhodné pre svoju produktivitu, kde je možné za jeden deň zmerať 15-25 km pri rýchlosti člna 5km/h. Pri väčších hĺbkach je možné metódu aplikovať pod hladinou podzemnej vody bližšie ku dnu. Toto riešenie je však náročnejšie na technické vybavenie a taktiež tu prichádza do úvahy zachytenie meracieho kábla o predmety na dne a tým aj poškodenie meracej súpravy. Výsledky získané použitím elektrickej tomografie možno ešte zlepšiť použitím sonáru na meranie hĺbky vody. Kombináciou týchto dvoch metód vieme následne vytvoriť 3D model nádrže spolu s hrúbkou sedimentov. Takýto model nám umožní vytvoriť si predstavu priestorovej distribúcie a ukladania sedimentov a taktiež spočítať ich objem.
Keďže prirodzené zanášanie a akumulácia dnových sedimentov v umelo vybudovaných vodných nádržiach má výrazné negatívne vplyvy na životnosť, funkčnosť a efektívnu využiteľnosť vodných diel, určenie množstva sedimentov a pravidelná aktualizácia údajov o zásobnom objeme vodnej nádrže umožňujú zreálnenie prognóz zanášania a vytvorenie relevantných predpokladov pre návrh efektívnych ochranných opatrení v povodí, vedúcich k minimalizácii negatívnych dôsledkov. Následnou realizáciou účinných opatrení dosiahneme zmiernenie negatívnych dôsledkov a zníženie nákladov na prevádzku a údržbu nádrží (Weis, Kubinský 2014)

**Metodika merania**

**Elektrická odporová topografia (ERT)** je geofyzikálna metóda, ktorá nám poskytuje vo vysokom rozlíšení informácie pod zemským povrchom vo vertikálnom ako aj v laterálnom smere. Metódu ERT je možné v špeciálnej konfigurácii aplikovať na vodnej hladine za účelom zistenia mocnosti sedimentov. Samotné merania sa realizujú viac kanálovou aparatúrou a špeciálne uspôsobeným 24, alebo 48 elektródovým meracím káblom umožňujúcim merania na vodnej hladine. Vzájomná vzdialenosť elektród od ktorej závisí detailnosť prieskumu a hĺbkový dosah sa zvyčajne pohybuje v intervale 1m až 5m, čo nám umožní získať veľmi detailné informácie pod meranými profilmi do hĺbky cca 10 – 20 m. ERT prieskum môže byť realizovaný rôznymi elektródovými usporiadaniami v závislosti na špecifikácie úlohy. Výber správneho elektródového usporiadania závisí od veľkej miery na druhu požadovanej informácie, hustoty merania, šumu a v prípade merania na vodnej hladine aj vodivosti vody. Pred začatím merania na vodnej hladine boli jednotlivé usporiadania testované a ako najvhodnejšie sa nám prejavilo usporiadanie recipročný Schlumberger, ktorý bol následne použitý v celej záujmovej oblasti.
Na interpretáciu nameraných zdanlivých odporov bol použitý program na výpočet inverznej úlohy v modifikácii pre plávajúci elektródový systém na vodnej hladine. Bola počítaná 2D úloha, pri ktorej sa predpokladá, že merné odpory sa menia iba v smere profilu (os X ) a s hĺbkou (os Z), zatiaľ čo kolmo na profil (v smere osi Y) zostávajú v podstate konštantné. Inverzia nám umožňuje namerané dáta transformovať na súbor hodnôt skutočného merného elektrického odporu a na ich základe získať obraz o reálnej štruktúre vyšetrovaného horninového prostredia.

**Ohmex SonarMite** je hydrografické mapovacie zariadenie s presnosťou 0,025 m. Zariadenie vysiela lúč o frekvencii 235 kHz a na základe odrazu od dna sa vracia späť a následne pomocou algoritmov ukladá údaj o hĺbke, pričom je tento sonar spojený s GNSS zariadením Trimble ProXH a pripája k údaju o hĺbke aj presné súradnice. Zariadenie bolo osadené na korme plavidla. Pred začatím merania bol Ohmex SonarMite nakalibrovaný, zároveň údaj o hĺbke dna bol aj fyzicky overený. Schématický náčrt merania a zapojenia prístrojov je na obrázku 1.




Obr.1 schematická situácia meranie elektrickej odporovej tomografie v kontinuálnej modifikácii na vode

**- Výsledky a diskusia**

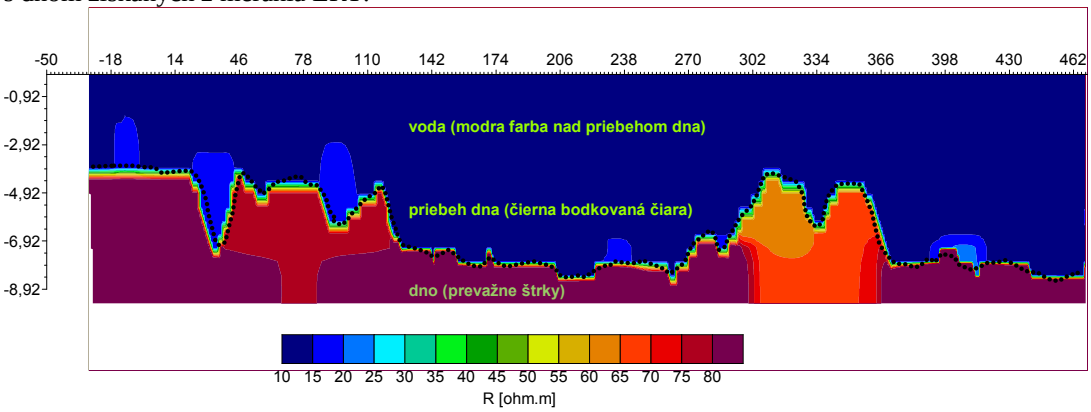
Elektrická odporová Tomografia (ERT)- bola aplikovaná na vodnej ploche na ktorej bolo zmeraných 16 ERT profilov (obr. 2). Súčasne s meraním ERT prebiehalo kontinuálne meranie dna so sonarom Ohmex SonarMite, ktoré slúžilo na určenie čo najpresnejšieho priebehu dna pod odmeranými ERT profilmi. Obidve zariadenia boli počas merania prepojené s presnými GPS prijímačmi od firmy Trimble. Jednotlivé profily boli spracované vo forme 2D inverzných rezov, pričom do inverzného procesu vstupovali nasledovné parametre: pozícia xy (JTSK), zdanlivý merný odpor, hĺbka dna a rezistivita vody v jazere meraná in-situ (priemerná hodnota 14.14 ohm.m). Výsledkom 2D spracovania boli odporové inverzné rezy (Obr.3), z ktorých sme následne vyexportovali údaje o zmene merného odporu pod hladinou jazera vo vertikálnom a laterálnom smere. Z týchto údajov bola

spracovaná databáza S1 s celkovým počtom 51878 údajov. Získané údaje boli použité k 3D vizualizácii jednotlivých meraných plôch a k výpočtu objemu sedimentov.



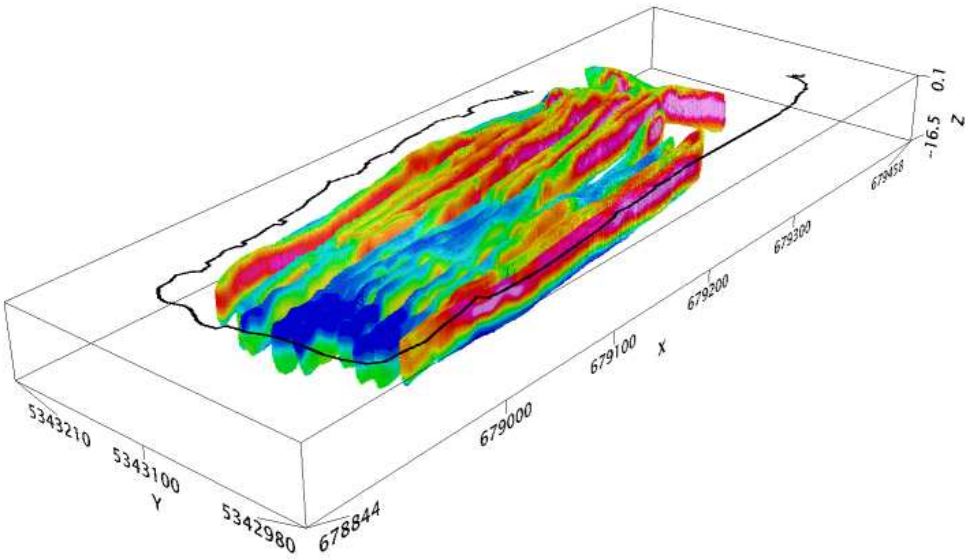
- Obr.2 Situácia merania

Spracovanie jednotlivých profilových meraní bolo najprv realizované vo forme 2D vrezov. Na obrázku 3 je zobrazený výsledok inverzného procesu na jednom profile. Modrá farba predstavuje vodu o odpore 10-15 ohm.m, čo veľmi dobre súhlasí s meraniami odporu vody in-situ, kde vypočítaná priemerná hodnota (17 meraní v rôznej hĺbke a na rôznych pozíciách kvôli zonálnosti vody) bola 14.14 ohm.m. Červená farba (60-80 ohm.m) sú štrky dna. Na obrázku môžeme vidieť priebeh merania sonarom (čierna bodkovaná čiara) a jeho koreláciu s dnom získaných z merania ERT.



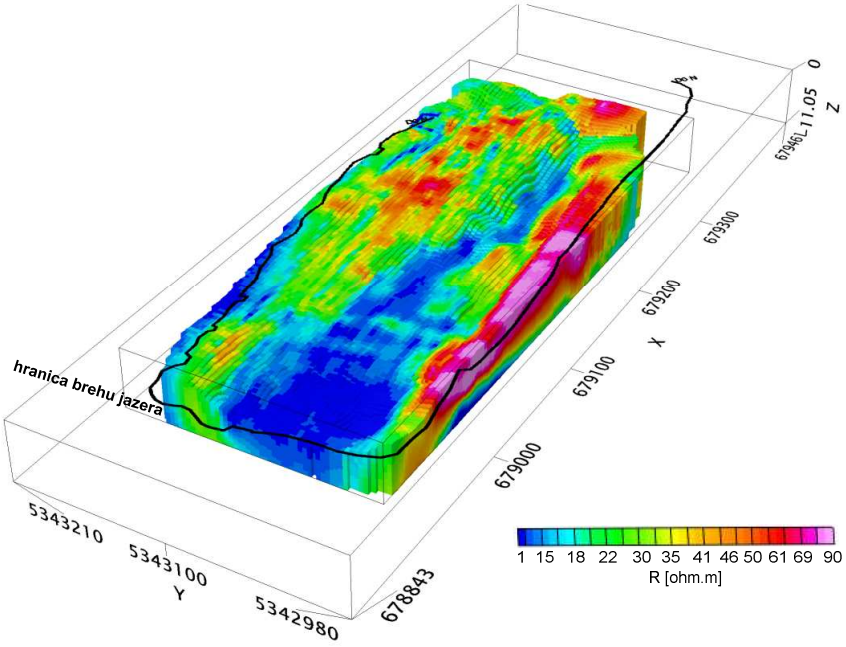

- Obr.3 2D interpretácia merania ERT a sonaru na vodnej hladine

Po spracovaní jednotlivých 2D profilov, ktoré sú znázornené na obrázku 4 sme pristúpili k 3D spracovaniu, kde všetky namerané údaje boli vypočitané softvérom Res3DInv (Loke, 2015), ktorý na rozdiel od 2D verzii zohľadňuje aj zmeny v smere osi Y.



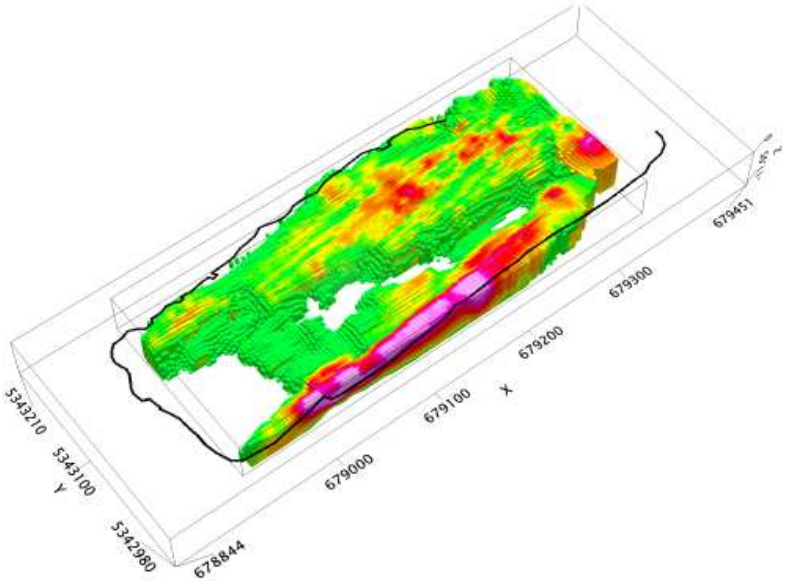

Obr.4 3D situácia inverzných 2D rezov

Výsledkom 3D modelovania bol v prvej fáze model dna celej plochy jazera (obr.5). Na obrázku možno vidieť reliéf dna po krajoch tvorený štrkmi-piesčitými štrkmi (nad 50 ohm.m – červená farba).V centrálnej časti modelu prevláda modrá farba (do 18 ohm.m), ktorá znázorňuje sedimenty dna (blato, ílovite-ilovito piesčité sedimenty, organické znečistenie).



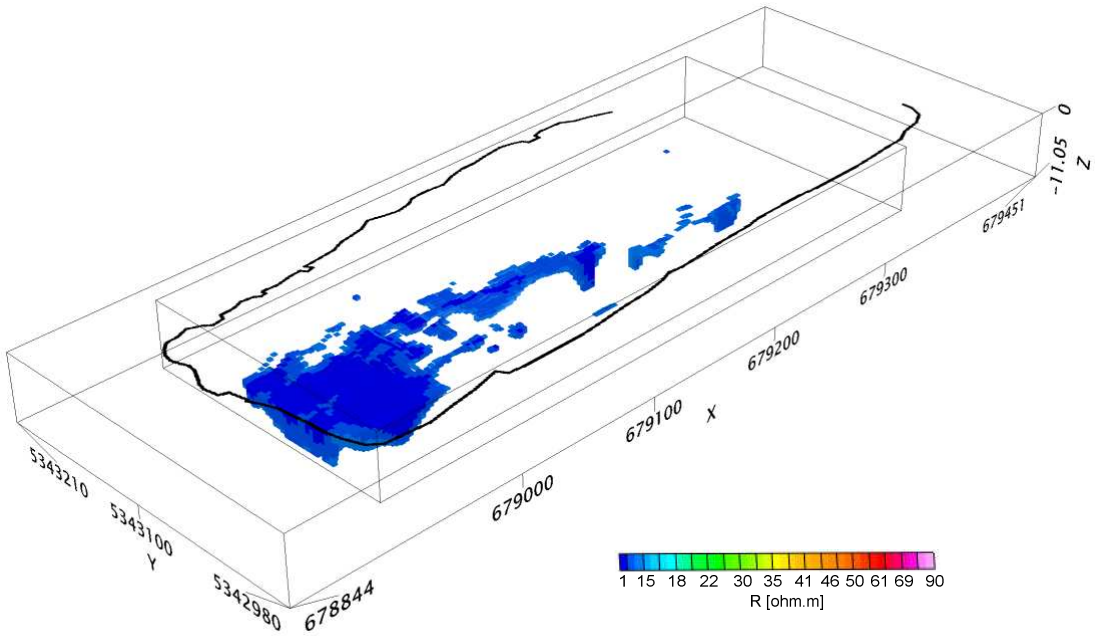

Obr.5 3D inverzia, celkový model priebehu dna jazera

V druhej fáze sme z modelu odstránili sedimenty dna. Na obrázku 6 vidíme plochu dna jazera bez sedimentov, prázdne miesta (diery) na dne sú časti kde mocnosť sedimentov bola hlbšie ako hĺbkový dosah meracieho systému (viac ako 10m) a nevieme určiť spodný okraj sedimentov dna.




Obr.6 3D inverzia, celkový model priebehu dna jazera bez sedimentov

V tretej fáze sme modelovali samotné sedimenty, pričom sme zvolili sedimenty o mernom odpore 1-11 ohm.m, čo predstavuje veľmi bahnito ílovité až organické sedimenty. Pre takto navrhnutý model sme vypočítali objem sedimentov na 23 000 m3 (obr. 7).




Obr.6 3D inverzia, sedimenty o odpore 1-11 ohm.m, vypočítaný objem sedimentov: 23 000 $m^3$

**Záver**

Rozvoj a inovácie geofyzikálnych prístrojov rozšíril možnosť ich využitia, a hlavne umožnil ich využitie na menej štandardné aplikácie ako je prieskum dna pod vodnou hladinou. Uvedené techniky merania a výsledky spracovania nám indikujú vysokú efektivitu a presnosť 3D modelu dna a dnových sedimentov, s možnosťou výpočtu objemov dnových sedimentov. Metóda merania elektrickej odporovej tomografie, spolu s georadarom a presným GPS zameraním nám môže nájsť uplatnenie aj v nasledovných oblastiach:

- Mapovanie dna vodných tokov (hrúbka usadeného materiálu, 3D model koryta)
- Dynamika zanášania vodných tokov a jazier
- Stanovenie aktuálneho akumulačného objemu nádrže
- Výpočet objemu sedimentov
- Priestorová distribúcia zanášania

**- Poďakovanie**

:Tento článok vznikol vďaka podpore projektov: VEGA 1/0396/12, VEGA 1/0131/14, VEGA 1/0141/15, APVV 0129-12

-

**Literatúra**

HOLLISTER, J., MILSTEAD, W. B. (2010): Using GIS to estimate lake volume from limited data. Lake and Reservoir Management, 26, č. 3, s. 194–199.

KUBINSKÝ, D., WEIS, K., (2012): Zmeny retenčného objemu v priestore brennerštôlňanskej vodnej nádrže ,Acta Universitatis Matthiae Belii, Séria environmentálne manažérstvo / issn 1338-449x, issn 1338-4430,

LOKE M. H., 2015: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (online document). Geotomo Software, Malaysia. [Cited 24 Feb 2015]. Available from URL: http://www.geotomosoft.com/downloads.php

WEIS, K., KUBINSKÝ, D. (2014): Analýza zmien objemu Halčianskej vodnej nádrže vplyvom erózie ako podklad pre manažment v povodí. Geografie, 119, č. 2, s. 126–144

PUTIŠKA,R., KUŠNIRÁK, D., DOSTÁL, I,.(2013): Waterborne GPR survey for riverbed- sediment mapping, Contributions to Geophysics and Geodesy, ISBN 978-80-85754-27-8. - S. 58-59

## Geophysical image of bottom sediment

David Kušnirák, René Putiška, Ivan Dostál

Frequent and natural problem of water reservoirs is their clogging by the sediment due to several processes such as erosion, transport and deposition of bottom sediments in the water bodies. All these processes have a significant impact on the operation and at the same time have a significant impact on the river system and its environment. Currently it is possible to use a variety of new methods and techniques for measuring of the thickness of bottom sediments. Such methods unquestionably include also geophysical technique of data collecting, which make it possible to deal with this issue more extensively from the qualitative and quantitative aspect. Electrical resistivity tomography (ERT) has been applied on the water surface, where 16 ERT profiles were measured. Simultaneously with the ERT measurement a continuous measurement of the water bottom with the Ohmex SonarMite sonar was carried out, which served for determining the course of the measured ERT profiles as accurately as possible. Both devices have been connected to accurate GPS receivers from Trimble Company during the measurement. All profiles have been processed as the 2D inversion sections and a 3D model.
The result of 3D modelling in the first phase has been model of the whole area of the lake, in the second phase, the bottom sediments have been removed from the model and in the third phase the bottom sediment was modelled by itself. Method of electrical resistivity tomography measurement together with the sonar and accurate GPS targeting may also find application in the following areas for us:

- Bathymetry mapping of water areas (the thickness of the settled material, 3D model of water bodies)
- Dynamics of clogging of rivers and lakes
- Determination of the current accumulation volume of reservoirs
- Calculation of the volume of the bottom sediments
- Spatial distribution of the clogging

**- Informácie o autoroch:**

RNDr., René Putiška, PhD.
PRIF UK, Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky
Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4
Mail: putiška@fns.uniba.sk
Tel: +421 902 352 490

Mgr., Ivan Dostál, PhD.
PRIF UK, Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky
Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4
Mail: dostal@fns.uniba.sk

Mgr., David Kušnirák, PhD.
PRIF UK, Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky
Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4
Mail: kusnirak@fns.uniba.sk