VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE BIOSEALING METODOU EIS
VERIFICATION TECHNOLOGY BIOSEALING BY EIS METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Hana Fránková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVIŠTĚ	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Hana Fránková
NÁZEV	Ověření technologie BioSealing metodou EIS
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKANÁT -29-

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

BLAUW, M., LAMBERT, J. W. M., LATIL, M. N. (2010). Biosealing: A Method for in situ Sealing of Leakages. In: Ground improvement technologies and case histories, Autor C F Leung; Jian Chu; R F Shen; Geotechnical Society of Singapore. Vydavatel: Singapore: Research Publishing Services, ©2010. ISBN: 9789810831240 9810831242, p. 125-130.
FEJFAROVÁ, M. (2014). Možnosti detekce obsahu vody v pórovitém prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie. Disertační práce obor Stavební inženýrství (nD) – Vodní hospodářství a vodní stavby. FAST VUT v Brně.
GUO, H. X., CHENG, X. H., LI, M. (2012). Experimental analysis of bio-stimulated sealing proces in environmental geotechnical engineering. Science China Technological Sciences. In: Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, March 2013, Vol. 56, No 3: p. 732-738.
HASHIMOTO, T., YUJIAN, L. (2011). New technologies for underground construction in soft ground of urban area. In: China's 5th International Symposium on Tunneling. PJG Association, A method of Pendulous Jet Grout, 7th edition, p. 1-16.
HODÁK, J. (2010 - 2012). Vývoj nových metod pro zvýšení bezpečnosti přehrad – etapové výzkumné zprávy I – VIII.
LAMBERT, J., VEENBERGEN, V., VAN DER HOEK, E. AND KARSTENS, S., (2004). Environment BioSealing: How Micro-Organisms Become Our Little Allies in Repairing Leaks. Ingeokring Newsletter, Vol. 11. No. 1, p. 9-12.
LIAO, H. (2005). Experimental study on BioSealing technique for seepage prevention. MSc thesis, UNESCO-IHE Institute for Water Education/GeoDelft, Delft, the Netherlands.
LIAO, H., ZHAO, K., LAMBERT, J. W., & VEENBERGEN, V. (2007). Experimental study on biosealing technology for seepage prevention. age, 1000, 3.
PAŘÍLKOVÁ, J., PAŘÍLEK, L. (2015). Monitoring of the earth-fill dam of the Hornice reservoir by EIS. EUREKA 2015, ISBN 978-80-214-5149-0, ISSN 2464-4595, p. 205-224.
RADKOVSKÝ, K. (2015). Automatic continuous measurement with Z-meter IV. EUREKA 2015. ISBN 978-80-214-5149-0, IS

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Rešerše podkladů k problematice monitorování zemních hrází se zaměřením na vodní dílo (VD) Hornice.
Rešerše podkladů technologie BioSealing.
Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.
Koncepce a realizace měření na VD Hornice.
Zpracování vybraných měření.
Dokumentace a vyhodnocení měření.
Předpokládaný rozsah práce cca 90 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá ověřením technologie BioSealing metodou elektrické impedanční spektrometrie. BioSealing je inovativní metoda sanace zemních těles, která k utěsnění průsaku využívá stimulace bakteriální aktivity zeminy. Metoda byla vyvinuta v Nizozemí a v letech 2015 a 2016 byla poprvé aplikována v podmínkách České republiky, a to na vodním díle Hornice. Zemní hráz vodního díla byla v tomto období monitorována rovněž metodou elektrické impedanční spektrometrie aparaturou s přístrojem Z-metr IV a naměřená data jsou zpracována a posouzena v této diplomové práci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodní nádrž, zemní hráz, zemina, voda, elektrická impedanční spektrometrie, sonda, BioSealing, bakterie, sanace

ABSTRACT

Diploma thesis is dealing with recognition of Biosealing technology using electrical impedance spektrometry method. BioSealing is an innovative method of soil body reconstruction, which uses stimulation of soil bacterial activity to seal the leakage. The method was developed in the Netherlands and it was used in conditions of the Czech Republic in years 2015 and 2016 on the Hornice water work. This earth dam was monitored by electrical impedance spectrometry by apparatus with device Z-meter IV in this period and the data are processed and assessed in this diploma thesis.

KEYWORDS

Water reservoir, earth dam, soil, electrical impedance spectrometry, probe, BoiSealing, bactery, reconstruction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Hana Fránková *Ověření technologie BioSealing metodou EIS.* Brno, 2017. 104 s., 5 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2017

Hana Fránková

Bc. Hana Fránková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za odborné vedení, cenné rady při zpracování diplomové práce a poskytnutí potřebných podkladů, panu Luboši Pařílkovi za realizaci sondy pro měření úrovně hladiny vody v nádrži a spolupráci při její kalibraci. Dále děkuji Ing. Davidu Ruppovi za cenné informace ohledně aplikace metody a technologie BioSealing a společně i RNDr. Otakarovi Pazdírkovi poskytnutá data.

OBSAH

1 ÚVOD 10

1.1 Cíle práce 11

1.2 Metodika práce 12

2 MALÉ VODNÍ NÁDRŽE 13

2.1 Historie zemních hrází 13

2.2 Rozdělení malých vodních nádrží 15
2.2.1 Rozdělení malých vodních nádrží z funkčního hlediska 15
2.2.2 Rozdělení malých vodních nádrží dle přítoku vody 19

2.3 Zemní hráze malých vodních nádrží 20
2.3.1 Materiál na stavbu hráze 21
2.3.2 Homogenní zemní hráz 24
2.3.3 Nehomogenní zemní hráz 25

2.4 Funkční objekty malých vodních nádrží 26
2.4.1 Výpustná zařízení 26
2.4.2 Bezpečnostní objekty 27
2.4.3 Odběrná zařízení 28
2.4.4 Sdružené objekty 28
2.4.5 Speciální objekty 28

3 PORUCHY HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ 29

3.1 Příčiny poruch 29

3.2 Způsoby porušení zemních hrází malých vodních nádrží 30
3.2.1 Erozivní činnost proudu vody 30
3.2.2 Filtrační deformace 30
3.2.3 Další příčiny poruch 31

4 MONITOROVÁNÍ HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ 32

4.1 Geofyzikální metody 33
4.1.1 Geofyzikální metody používané k monitorování zemních hrází malých vodních nádrží 34

5 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE 36

5.1 Princip měření metodou EIS 38

5.2 Přístroj Z-Metr IV ... 38

6 ZPŮSOBY SANACE ZEMNÍCH HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ .. 41

6.1 BioSealing ... 41

6.2 Princip metody BioSealing ... 42

6.3 Hodnotící kritérium metody BioSealing ... 42

6.4 Podmínky aplikace metody BioSealing ... 43

6.5 Použití technologie BioSealing v České republice ... 44
6.5.1 Výběr vhodné lokality ... 44

7 VODNÍ DÍLO HORNICE ... 45

7.1 Základní technické údaje ... 45

7.2 Inženýrskogeologický průzkum a systém monitorování ... 48

8 INJEKČNÍ PRÁCE METODY BIOSEALING ... 50

8.1 První etapa ... 51

8.2 Druhá etapa ... 52

9 POUŽITÍ METODY EIS NA HRÁZI VD HORNICE ... 55

9.1 Sondy metody EIS ... 55

9.2 Sledování změn úrovně hladiny v nádrži ... 59
9.2.1 Sledování změn úrovně hladiny v nádrži hydrostatickým snímačem úrovně hladiny ... 59
9.2.2 Sledování změn úrovně hladiny v nádrži pomocí EIS ... 61

9.3 Měření elektrické vodivosti v oblasti výronové plochy ... 65

10 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ... 66

10.1 Změny úrovně hladiny vody v nádrži ... 66

10.2 Monitorování důsledků aplikace metody BioSealing ... 69
10.2.1 Časové změny rezistance zeminy ... 69
10.2.2 Průběhy hodnot elektrické vodivosti a reaktance zeminy ... 75
10.2.3 Změny průměrné admitance ... 80
10.2.4 Tvorba map elektrické vodivosti v oblasti výronové plochy ... 82

11 ZÁVĚR 88

12 POUŽITÁ LITERATURA 94

12.1 Další použité zdroje 96

SEZNAM TABULEK 97

SEZNAM OBRÁZKŮ 98

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 101

SEZNAM VELIČIN 102

SEZNAM PŘÍLOH 103

1 ÚVOD

S rozvojem lidské společnosti se vždy pojila potřeba hospodařit s vodou. Nerovnoměrnost rozložení srážek během roku vyvolala potřebu vodu akumulovat pro závlahy v suchém období a naopak chránit obyvatelstvo a majetek před povodněmi způsobenými dlouhotrvajícími dešti. Proto lidé od starověku budovali vodní nádrže různých typů, tvarů a funkcí, které zabezpečovali hrázemi. Hráze malých vodních nádrží (MVN) bývají budovány z místních materiálů a rozdělovány podle různých kritérií. MVN budované v současné době plní především funkce účelové a krajinotvorné (Šálek, 1996). Při dobrém návrhu, organizaci a vzájemné koordinaci nakládání s vodou mohou mít MVN velký význam v protipovodňové ochraně. Aby vodní nádrže správně plnily své funkce v krajině, je nutné, aby jejich zemní hráze byly z technickobezpečnostního hlediska v dobrém stavu. Proto je vhodné hráze i po ukončení výstavby nadále monitorovat. Zejména v případě, že byla během inženýrsko-geologického průzkumu nebo při provozu stanovena riziková místa, je důležité vědět, jak se mění vlastnosti zeminy v průběhu zatěžování vodního díla. Pro monitorování zemní hráze lze využít metody přímé a nepřímé. Přímé metody jsou destruktivní, proto se vedle vizuální kontroly zemních hrází MVN stále častěji uplatňují nepřímé monitorovací metody, které lze v mnoha případech považovat za metody nedestruktivní a tedy šetrnější ke konstrukci zemní hráze. Nepřímou metodou monitorování zemních hrází je také metoda elektrické impedanční spektrometrie (EIS), která na základě elektrické vodivosti zeminy usuzuje na stupeň nasycení zeminy vodou.

Výstavba jakéhokoli vodního díla však s sebou vždy nese určité riziko jeho porušení (Jandora a Říha, 2002). Poruchy hrází MVN mohou být způsobeny např. vadami projektové dokumentace, nekvalitní výstavbou, stárnutím konstrukcí, nedostatečnou údržbou nebo zanedbáním technickobezpečnostního dohledu. Poruchy zemních hrází se dělí na poruchy způsobené erozivní činností proudu vody, poruchy v důsledku filtračních deformací a ztrátu stability ve formě sesuvů a trhlin. Tyto typy poruch spolu v praxi souvisejí a projevují se současně, případně ovlivňují jedna druhou. V případě, že je porucha lokalizována včas, nemusí nutně dojít k porušení celého vodního díla, je však většinou nutné omezit jeho provoz a co nejdříve přistoupit k sanaci hráze. Ta se provádí nejčastěji pomocí metod tzv. speciálního zakládání (Rupp, 2016). Tyto metody jsou však značně náročné jak po stránce technologické, tak i finanční. Proto se tato oblast stále rozvíjí a hledají se nové možnosti sanace vodních děl. Jednou z nových a rozvíjejících se metod rekonstrukce zemních těles je metoda a technologie BioSealing.

1.1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce s názvem „Ověření technologie BioSealing metodou EIS“ je posouzení a komparace dat získaných metodou EIS v průběhu realizace technologie BioSealing na VD Hornice a ověření možností využitelnosti uvedené technologie sanace v podmínkách České republiky.

Řešení diplomové práce vychází z rešerše dostupných informací o hrázích MVN se zaměřením na zemní hráze, o příčinách a způsobech jejich porušení, o možnostech jejich monitorování a sanování poruch. Podrobně je uvedena monitorovací metoda elektrické impedanční spektrometrie (EIS), nepřímá měřicí metoda využívající měření elektrické impedance k posuzování charakteristik zemin (Pařílková a kol., 2014) a sanační metoda a technologie sanace hrází MVN BioSealing, inovativní metoda sanace zemních těles. Metoda BioSealing byla vyvinuta v Nizozemí (Rupp a kol., 2016), kde byla také testována v laboratořích a následně v terénu a skupina vynálezců, kterou vedl pan Wilhelmus Hendrikus van der Zon ji 2. 4. 2007 podala k patentování. Publikování patentu se uskutečnilo 4. 9. 2012 a pod číslem PCT/NL2007/050135 pro původního nabyvatele Stichting Deltares (http://www.google.tl/patents/US8256994) a je dále rozvíjena v mezinárodním průmyslovém projektu JIP (Joint Industry Project), jehož dalšími členy jsou společnosti Sireg (Itálie), Agrana Zuckerforschung Tulln (Rakousko), Bioclear (Nizozemsko), Texplor (Benelux), Avebe (Nizozemsko), Züblin Spezialtiefbau (Rakousko), Volker Staal en Funderingen (Nizozemsko) a GEO*test*, a.s. (Česká republika).

V roce 2014 byl zahájen pilotní projekt v České republice. Realizační práce aplikace technologie BioSealing v České republice s výhradním právem užití včetně monitorování prováděla společnost GEO*test*, a.s. ve spolupráci s Vysokým učením technickým, Fakultou stavební, Ústavem vodních staveb řešením projektů „Zavedení nové technologie zamezující průsakům a únikům vody tělesem přehradních hrází“ (Rupp, 2013) a „Systém sledování vybraných parametrů porézních látek metodou EIS v širokém spektru aplikací“ (Pavlík, 2013; Pařílková, 2013). Moje diplomová práce uvádí realizaci pilotní aplikace technologie BioSealing v podmínkách České republiky, a to na vodním díle (VD) Hornice v kraji Vysočina, která proběhla v letech 2015 a 2016 ve dvou variantách dávkování živin stimulujících růst bakterií obsažených v zeminách a při různých úrovních hladiny vody v nádrži.

Současně s aplikací technologie BioSealing na uvedené lokalitě byly do tělesa hráze VD Hornice v roce 2014 osazeny 2 sondy využívající metodu EIS, (Pařílková a kol., 2015). Interval vodivých a nevodivých částí tyčí byl navržen na základě zjištěné geologické stavby hráze tak, aby bylo možno postihnout místo průsaku hrází. Při řešení své diplomové práce jsem se, kromě zpracování dat získaných z automatického měření, podílela v roce 2016 na realizaci zařízení pro snímání změn úrovně hladiny vody v nádrži

pomocí snímače EIS, což je první využití EIS k tomuto účelu, a na monitorování oblasti výronové plochy na vzdušním líci hráze. Uvedené měření jsem provedla pilotně společně s manžely Pařílkovými dne 2. 5. 2016 a následně se dvěma diplomanty z Technické university Varna, Bulharsko v průběhu aplikace technologie BioSealing dne 19. 5. 2016 a přibližně za měsíc dne 22. 6. 2016.

1.2 METODIKA PRÁCE

Pro dosažení cílů své diplomové práce jsem zvolila následující činnosti:

- řešerše literatury s problematikou zemních hrází MVN včetně stručného popisu v teoretické části,
- řešerše literatury a shrnutí informací o porušení zemních hrází, včetně jejich monitorování a sanace,
- seznámit se s technologií BioSealing a popsat její princip,
- popsat metodu EIS a princip měření elektrické impedance aparaturou s přístrojem Z-metr IV,
- podílet se na realizaci monitorování zemní hráze VD Hornice metodou EIS,
- naměřená data vyhodnotit a na jejich základě diskutovat možnosti sanace hráze VD Hornice technologií BioSealing.

Při aplikace metody EIS byla vyhodnocena data získaná ze dvou paralelních sond osazených v tělese hráze, a to vyhodnocením průběhu rezistance R v různých úrovních na jednotlivých sondách, zobrazením změn průměrné admitance a vyhodnocením průběhů hodnot elektrické vodivosti G a reaktance X naměřených vždy 15. den v měsíci ve 13 hod. Dále byla vyhodnocena a porovnána data získaná mobilní vidlicovou sondou v oblasti výronové plochy ze dne 19. 5. 2016, v průběhu aplikace technologie BioSealing, a 22. 6. 2016, tedy po ukončení injektáže. Data vypovídající o nasycení zeminy vodou v oblasti výronové plochy byla vyhodnocena v programu Excel a dále v programu Surfer 8. Shrnutí a posouzení výsledků je uvedeno v závěru diplomové práce.

2 MALÉ VODNÍ NÁDRŽE

Pod pojmem „malé vodní nádrže“ se rozumí vodní nádrže, jejichž největší hloubka nepřesahuje 9 m a objem po hladinu ovladatelného prostoru (normální hladinu) není větší než 2 mil. m^3 (ČSN 75 2410). Největší hloubkou je největší hloubka dna od maximální hladiny, přičemž se neuvažují místní prolákliny dna, hloubka koryta napájecího toku apod. Normální hladina je nejvyšší hladina ovladatelného prostoru nádrže, která je vymezena korunou nehrazeného přelivu nebo horní hranou uzávěru hrazeného přelivu.

Pod pojmem rybník (Šálek, 2001 se rozumí malá vodní nádrž určená především k chovu ryb, v níž je možné hospodařit s možností úplného a pravidelného vypouštění vody. Uspořádání, technické vybavení a provoz rybníka odpovídají potřebám rybníkářského hospodaření.

2.1 HISTORIE ZEMNÍCH HRÁZÍ

Historie staveb zemních hrází sahá až k roku 2000 před naším letopočtem, kdy byla v Mezopotámii postavena první známá zemní hráz Nimrod přes řeku Tigris (Smith, 1972). Hráz plnila hned několik funkcí, z nichž nejvýznamnější byly spojeny s protipovodňovou ochranou a závlahami.

Na českém území byly zemní hráze budovány pravděpodobně již v 8. a 9. století (Šálek, 1996). Z válečných výprav na počátku 14. století si čeští šlechtici přiváželi poznatky o výstavbě rybníků a chovu ryb, což je datováno jako začátek rybnikářství u nás (Šálek, 2001). Od poloviny 14. století dochází k budování vysokých zemních hrází v širokých údolích a rybníků v močálových rovinách. Rybniční hospodářství se stalo nezanedbatelným zdrojem příjmů.

Obr. 2.1 Letecký pohled na rybník Rožmberk po výlovu (ČSN 752410)

V období husitských válek výstavba hrází upadla a mnoho stávajících děl bylo strženo (Šálek a kol., 1983). Teprve v 70. letech 15. stol. přichází opět zájem o rybníkářství. V 16. století se začala budovat Zlatá stoka, která zásobuje třeboňské rybníky vodou z Lužnice. V této době dochází k vybudování dvou největších rybníků v Čechách – Svět a Rožmberk (Obr. 1.1). Rybník Rožmberk s hrází o délce 2,5 km s maximální výškou 11,5 m patřil v té době k technicky nejvyspělejším vodohospodářským dílům ve střední Evropě [2].

Od 17. století došlo ke stagnaci výstavby rybníků, která byla obnovena až na konci 19. století za účelem organizovaného vědeckého chovu ryb (Šálek, 2001). Počátek 20. století byl ve znamení rekonstrukcí a obnov významných třeboňských rybníků. V současné době se budují malé vodní nádrže (MVN), které plní účelové funkce (převážně protipovodňové), jako krajinotvorné prvky nebo jsou součástí biocenter (Vrána a Beran, 2008).

V České republice existuje přibližně 20 000 MVN, z nichž velkou část představují historické rybníky [2]Největší koncentrace rybníků je v jižních, středních a východních Čechách a v některých částech Moravy. Od výstavby zemních hrází a funkčních objektů těchto vodních děl uběhlo obvykle několik staletí, čemuž často odpovídá technický stav staveb.

Rybníky byly stavěny za účelem chovu ryb, ale současně se jedná o vodní díla s vodohospodářským významem. Vzhledem k malé hloubce vody optimální pro chov ryb a většímu převýšení koruny hráze nad provozní hladinu jsou rybníky schopny zachytit vody při povodňových situacích [2]. Retenční a transformační schopnosti MVN se projevily při katastrofálních povodních v červenci 1997 ve východních Čechách a na Moravě a hlavně velmi výrazně v srpnu 2002 v jižních Čechách. Uvedené povodně byly nejvýznamnější povodně posledních let. I když při povodni 1997 došlo k poškození nebo protržení hrází MVN jen ojediněle, v roce 2002 se 23 rybničních hrází protrhlo a 83 bylo výrazně poškozeno. U novodobých MVN, vybudovaných ve druhé polovině 20. století, ve vlastnictví či správě podniků Povodí, k významnému poškození nedošlo (Hladný, 2005). I proto jsou MVN důležitými vodohospodářskými objekty.

Následkem lokálních povodní způsobených i krátkodobými přívalovými dešti dochází k protržení jedné až pěti zemních hrází ročně (Hladný, 2005).

Při dobré organizaci manipulací a vzájemné koordinaci soustav význam MVN spočívá ve značném využitelném potenciálu v protipovodňové ochraně. K tomu, aby se i v budoucnu dalo jejich schopností využít, je nutné, aby i zemní hráze MVN byly z technicko-bezpečnostního hlediska v dobrém technickém stavu.

MVN budované v současné době plní především funkce účelové a krajinotvorné (Šálek, 1996). Rybníky patří k významným krajinným prvkům, utvářejícím vzhled krajiny a přispívají k udržení její stability (Šálek a kol., 1983).

2.2 ROZDĚLENÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Malé vodní nádrže lze rozdělit z různých hledisek, například z hlediska krajině ekologického, provozně funkčního a dále podle tvaru a uspořádání apod. (Šálek, 1997). Dle krajinného a ekologického hlediska se MVN dělí na nádrže typu jezerní, údolní, rybniční, akumulační, suché a umírající. Uvedené dělení se však příliš nepoužívá, používanější je dělení podle funkce, které je shrnuto v následujících podkapitolách. Je ale nutné podotknout, že většina MVN je budována za účelem plnění více funkcí současně.

2.2.1 Rozdělení malých vodních nádrží z funkčního hlediska

Z funkčního hlediska je možné rozdělit malé vodní nádrže na nádrže zásobní, ochranné (retenční), nádrže upravující vlastnosti vody (čistící nádrže), rybochovné, hospodářské, provozní, asanační, rekreační, krajinotvorné a urbanistické (Šálek, 1996).

Zásobní nádrže

Tyto nádrže umožňují ve svém zásobním prostoru hromadění vody v době jejího nadbytku a vytvářejí tak rezervu pro období jejího nedostatku (Šálek, 1996). Do této skupiny patří nádrže

- **vodárenské**, určené k zásobování obyvatelstva, zemědělství a služeb pitnou a užitkovou vodou,
- **průmyslové**, využívané k zásobování průmyslových závodů užitkovou a provozní vodou,
- **závlahové**, vytvářející zásobu vody pro závlahu zemědělských plodin, lesních dřevin, městské zeleně apod.,
- **energetické**, které vytvářejí zásobu vody pro využití energetické, zejména v malých vodních elektrárnách,
- **kompenzační**, využívající zásobu vody pro nadlepšení požadovaných průtoků, případně jakosti vody ve vodním toku pod nádrží,
- **zálohové**, zabezpečující zásobu vody pro případ havárie nebo selhání dodávky vody z hlavního zdroje,
- **retardační** odvodňovací nádrže sloužící k zachycení, úpravě a využití vody nárazové odtékající z odvodňovacích soustav,

- **aktivizační** nádrže, které využívají zásobu vody pro aktivizaci, příp. zrovnoměrnění odtoků a zvýšení zásob podzemní vody v pramenných oblastech povodí.

Ochranné (retenční) nádrže

Ochranné nádrže zachycují v retenčním prostoru zvýšené povodňové odtoky, transformují povodňovou vlnu a částečně, případně úplně chrání níže položené území před negativními účinky velkých vod (Šálek, 1996).

- **Suché** ochranné nádrže využívají ochranný prostor k zachycení části až celého objemu povodňového odtoku a po průchodu povodňové vlny se opět řízeně vyprazdňují. Dna suchých nádrží se zpravidla využívají jako louky nebo pro pěstování rychle rostoucích dřevin.
- **Ochranné** nádrže s přesně vymezeným ochranným prostorem transformují povodňovou vlnu a po jejím průchodu se řízeně vyprazdňuje ochranný prostor až na hladinu zásobního prostoru, který je využíván přesně definovaným účelům.
- **Protierozní** nádrže plní více protierozních funkcí, zejména snižují podélný sklon údolí, dále plní funkci ochrannou, zachycují splaveniny, zvyšují půdní vlhkost v přilehlé oblasti, vytvářejí podmínky pro vývoj vegetačního krytu a část vody převádějí infiltrací do podzemních vod.
- **Dešťové** nádrže jsou určené k zachycení srážkových vod, jejich krátkodobé akumulaci a dalšímu využití podle lokálních potřeb.
- **Vsakovací** nádrže bývají navrženy především k zachycení, krátkodobé akumulaci a převedení srážkových vod do podzemních.
- **Nárazové** nádrže jsou určeny k vyrovnávání nárazových průtokových vln ve vzdálených profilech při řízení průtoku kompenzační nádrží.

Nádrže upravující vlastnosti vody

Uvedené nádrže jsou určeny k řízené změně fyzikálních, chemických a biologických vlastností vody (Šálek, 1996). Úpravy je dosaženo především přírodními způsoby čištění, probíhajícími ve vodním prostředí.

- **Předehřívací** nádrže bývají mělké ploché nádrže, které využívají sluneční záření k ohřevu především chladné podzemní vody.

- **Chladicí** nádrže jsou ploché nádrže určené k řízenému ochlazování oteplených vod z průmyslových a energetických zařízení.
- **Usazovací** nádrže slouží k zachycení splavenin sedimentací a k jejich následnému odstranění.
- **Aerobní biologické** nádrže s převažujícími čistícími procesy jsou určené k čištění povrchových a odpadních vod, dělí se na vysokozatěžované a nízkozatěžované.
- **Anaerobní biologické** nádrže s převažujícími anaerobními procesy se využívají k čištění odpadních vod zejména od průmyslových producentů apod. Dělí se na průtočné, sedimentační a akumulační.
- **Dočišťovací biologické** nádrže (rybníky) tvoří nádrže rybničního typu s rybí osádkou upravené k dočištění mechanicko-biologicky čištěných odpadních vod.
- **Kanalizační nádrže** se navrhují ke krátkodobé akumulaci a sedimentaci srážkových vod, přitékajících například z komunikací.

Rybochovné nádrže

Rybochovné nádrže neboli rybníky tvoří optimální prostředí pro chov ryb (Šálek, 1996). Mezi rybochovné nádrže se řadí například

- **líhňové** rybníky určené k odchovu raných stádií ryb Dubraviovou metodou.
- **Komorové** rybníky jsou určeny k přezimování ryb.
- **Třecí** rybníky tvoří malé vodní nádrže rybničního typu určené k odchovu raných stádií ryb staročeskou metodou
- **Sádky** jsou speciální nádrže určené ke krátkodobému přechovávání ryb mezi výlovem a distribucí.

Hospodářské nádrže

Hospodářské nádrže jsou budovány za účelem plněné konkrétních hospodářských funkcí (Šálek, 1996). Patří mezi ně například

- **požární** nádrže, které vytvářejí zásobu vody požadované jakosti pro likvidaci požáru,
- **revitalizační** nádrže, které jsou součástí revitalizačních opatření,
- nádrže určené k **pěstování vodních rostlin**.

Provozní nádrže

Provozní nádrže mívají různá upořádání a konstrukční řešení určená pro konkrétní provozní potřeby (Šálek, 1996). Do uvedené skupiny se řadí například

- **vyrovnávací** nádrže určené ke krátkodobému vyrovnávání nerovností mezi přítokem a odtokem (odběrem) vody, např. v závlahové síti, pod vodními elektrárnami se špičkovým provozem apod.,
- **infiltrační** nádrže budované za účelem umělého obohacování podzemní vody řízenou infiltrací,
- **přečerpávací** nádrže sloužící k akumulaci potenciální energie vody.

Asanační nádrže

Asanační nádrže se používají k asanaci zaplavením území narušeného lidskou činností, k zachycení a uskladnění látek poškozujících životní prostředí (Šálek, 1996).

- **Záchytné** nádrže bývají malé vodní nádrže určené k zachycení škodlivých látek při úniku, například v případě havárie,
- **skladovací** nádrže a odkaliště určené k bezpečnému skladování tekutých materiálů, kejdy, různých druhů kalů, apod. a jejich následnému využívání, případně zneškodnění,
- **otevřené** vyhnívací nádrže jsou opevněné a těsné nádrže určené k uskladnění a anaerobnímu vyhnití kalů.

Krajinotvorné a urbanistické nádrže

Krajinotvorné a urbanistické nádrže jsou navrhovány speciálně ke zlepšení okrasného a estetického účinku krajiny, sídliště, parků apod. (Šálek, 1996). Jedná se o konstrukčně i tvarově různorodá uspořádání MVN s různým vybavením. Jedná se například o nádrže:

- **hydromeliorační** pomáhající optimalizovat vlhkostní poměry v krajině a zvyšující zásoby podzemní vody,
- **okrasné**,
- a **umělé mokřady**, které tvoří kombinace vodních plocha mokřadů, jsou určené k regulaci vlhkostních poměrů, odtoků a jsou důležitou součástí biocenter.

Rekreační nádrže

Rekreační nádrže jsou určené zejména k provozování vodních sportů, mohou být doplněny speciálním vybavením, upraveným přístupem do vody, případně specifickou úpravou okolí nádrže (Šálek, 2001).

2.2.2 Rozdělení malých vodních nádrží dle přítoku vody

Dle přítoku vody se MVN dělí na průtočné a neprůtočné (Šálek, 2001).

Průtočné nádrže

Charakteristickým znakem průtočných nádrží je průtok celého vodního zdroje nádrží. K jejich vytvoření stačí poměrně krátká čelní hráz (Šálek, 2001). Nevýhodou je nutnost vybudování velkého bezpečnostního přelivu, obvykle na Q_{100}.

Obr. 2.1 Průtočná MVN u obce Hornice

Přítok vody do nádrže je dán odtokem vody z povodí nad nádrží a je tedy neregulovatelný. Nádrže na malých tocích akumulují vodu z jarních povodňových průtoků, zadržují část objemu povodňové vlny, zrovnoměrňují průběh odtoku a svým akumulačním prostorem mohou nadlepšovat průtoky pod hrázovým profilem. (Šálek, 2001) Při zvýšených průtocích však voda obsahuje velké množství nerozpuštěných látek, které se vlivem snížení rychlosti vody v nádrži usazují, což vede postupem času k zanášení nádrže a snižování zásobního prostoru, možnosti zhoršení funkce objektů nádrže a zrychlení eutrofizačních procesů s negativním účinkem na kvalitu vody (Vrána a Beran, 2008).

Neprůtočné nádrže

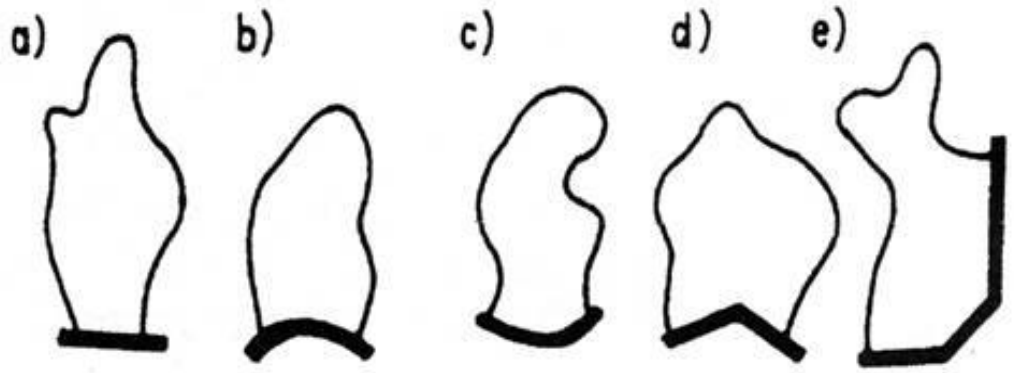
Typickým znakem neprůtočných nádrží je regulovatelnost přítoku do nádrže i možnost regulace odtoku (Šálek, 2001). Vedením vodního toku mimo prostor nádrže vznikají nádrže obtokové (břehové a boční), vyhloubením nádržního prostoru nádrže kopané.

Obr. 2.2 Neprůtočná MVN monitorovaná metodou EIS – soukromý rybník u obce Jevíčko (2.12.2011)

2.3 ZEMNÍ HRÁZE MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Hráz je základním prvkem MVN (Vrána a Beran, 2008). Výhodnost zemních hrází spočívá v možnosti využití místních materiálů pro jejich konstrukci, ve snadném přizpůsobení se základovým podmínkám a v možnosti využití vysoké mechanizace provádění (Žatecký, 2013).

Dle způsobu výstavby je možné rozlišit základní typy zemních hrází – sypaná, naplavovaná, balvanitá (Votruba a kol., 1978). Podle půdorysného uspořádání se jedná o hráze přímé, lomené, zaoblené (Obr. 2.3). Na základě příčného profilu a použitého materiálu se rozlišují hráze homogenní a nehomogenní.

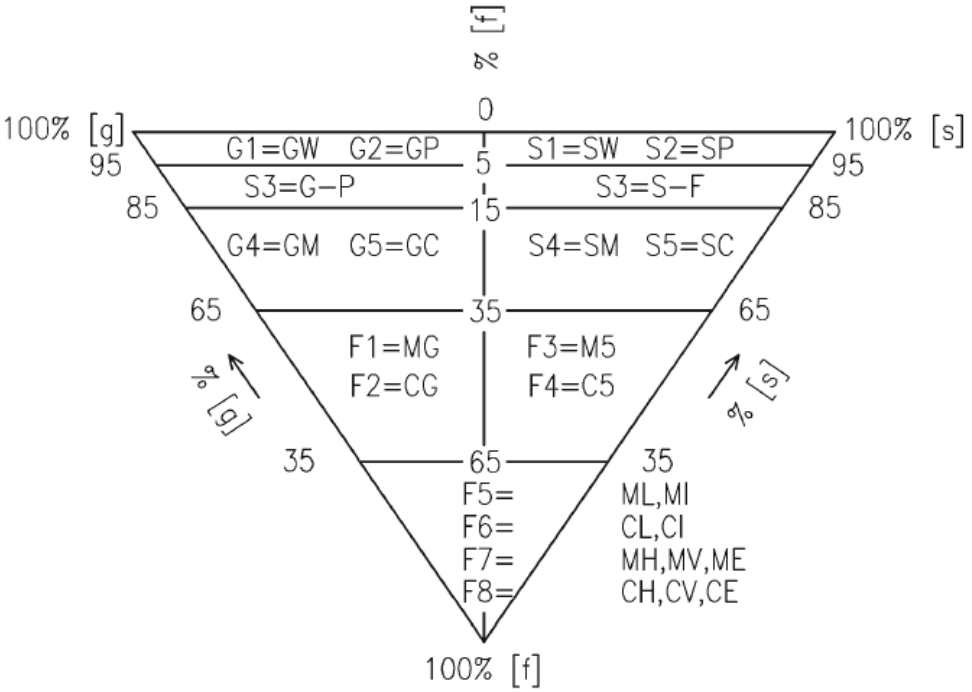


a) přímá, b) a c) zakřivené, d) a e) lomené (ČSN 75 2410)

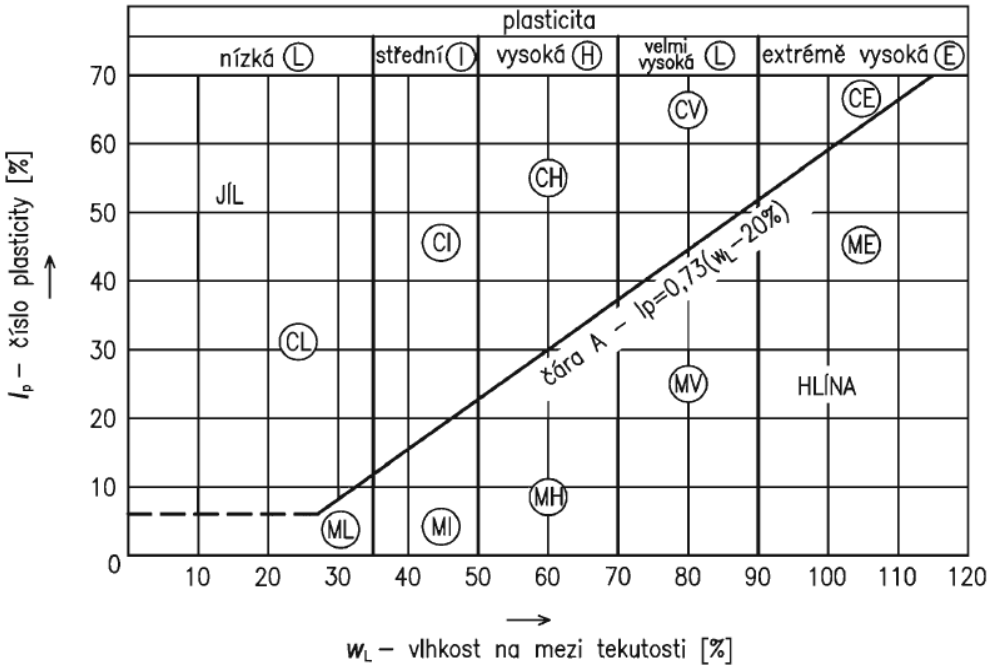
Obr. 2.3 Půdorysný tvar hrází

2.3.1 Materiál na stavbu hráze

Hráze malých vodních nádrží se navrhují zpravidla jako zemní. Zatřídění zemin vychází z ČSN 75 2310 „Sypané hráze“, z níž zatřídění přejímá také ČSN 75 2310 „Malé vodní nádrže“. Zatřídění zemin je patrné z tab. 2.1 a obr. 2.4 a obr. 2.5. Orientační vlastnosti zhutnělých zemin podle klasifikace jsou uvedeny v tab. 2.2. Zrnitostní složení a oblasti použitelnosti zemin jsou znázorněny na obr. 2.6.



Obr. 2.4 Klasifikační diagram zemin s částicemi < 60 mm (ČSN 75 2410)



Obr. 2.5 Diagram plasticity (pro částice < 0,5 mm) (ČSN 75 2410)

Tab. 2.1 Zatřídění zemin (ČSN 75 7410)

a) Klasifikace štěrkových zemin

Název zeminy	Symbol	Třída	Kvalitativní znaky			
			Obsah jemnozrnné frakce (<0,06 mm) [%]	C_u [-]	C_c [-]	Diagram plasticity
Štěrk dobře zrněný	GW	G1	<5	>4	1 až 3	-
Štěrk špatně zrněný	GP	G2	<5	<4	<1 nebo >3	-
Štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy	G-F	G3	5 až 15	-	-	-
Štěrk hlinitý	GM	G4	15 až 35	-	-	pod čárou A
Štěrk jílovitý	GC	G5	15 až 35	-	-	nad čárou A

b) Klasifikace písčitých zemin

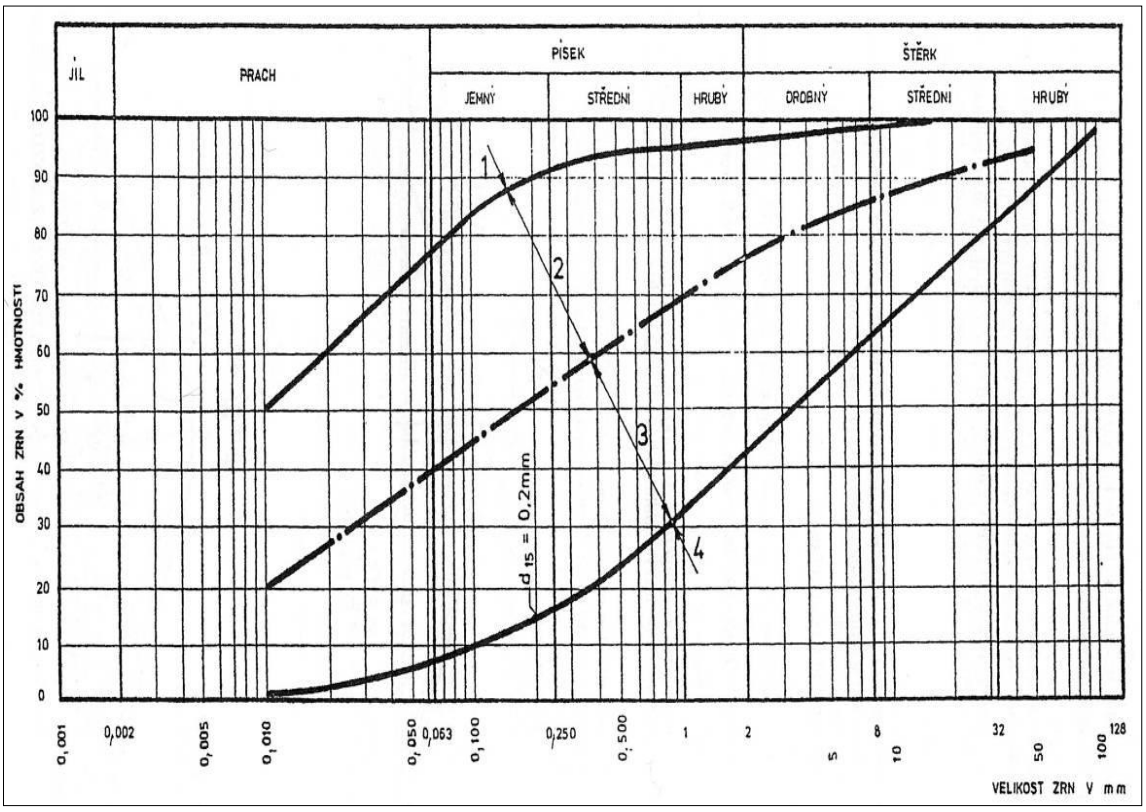
Název zeminy	Symbol	Třída	Kvalitativní znaky			
			Obsah jemnozrnné frakce (<0,06 mm) [%]	C_u [-]	C_c [-]	Diagram plasticity
Písek dobře zrněný	SW	S1	<5	>6	1 až 3	-
Písek špatně zrněný	SP	S2	<5	<6	<1 nebo >3	-
Písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S-F	S3	5 až 15	-	-	-
Písek hlinitý	SM	S4	15 až 35	-	-	pod čárou A
Písek jílovitý	SC	S5	15 až 35	-	-	nad čárou A

c) Klasifikace jemnozrnných zemin

Název zeminy	Symbol	Třída	Obsah jemnozrnné frakce (<0,06 mm) [%]	Poměr štěrkové (g) a písčité (s) frakce	Diagram plasticity (čára A)	w_L [%]
Hlína štěrkovitá	MG	F1	35 až 65	g>s	pod A	-
Jíl štěrkovitý	CG	F2	35 až 65	g>s	nad A	-
Hlína písčitá	MS	F3	35 až 65	g<s	pod A	-
Jíl písčitý	CS	F4	35 až 65	g<s	nad A	-
Hlína s nízkou plasticitou	ML	F5	>65	-	pod A	<35
Hlína se střední plasticitou	MI	F5	>65	-	pod A	35 až 50
Jíl s nízkou plasticitou	CL	F6	>65	-	nad A	<35
Jíl se střední plasticitou	CI	F6	>65	-	nad A	35 až 50
Hlína s vysokou plasticitou	MH	F7	>65	-	pod A	50 až 70
Hlína s velmi vysokou plasticitou	MV		>65	-	pod A	70 až 90
Hlína s extrémě vysokou plasticitou	ME	F11	>65	-	pod A	>90
Jíl s vysokou plasticitou	CH	F8	>65	-	nad A	50 až 70
Jíl s velmi vysokou plasticitou	CV	F8	>65	-	nad A	70 až 90
Jíl s extrémě vysokou plasticitou	CE	F8	>65	-	nad A	>90

Tab. 2.2 Orientační fyzikálně mechanické vlastnosti zhutněných zemin (ČSN 75 2410)

Skupina	Zdánlivá hustota		Standardní Proctorova zkouška		Objemová hmotnost suché zeminy		Smyková pevnost		Hydraulická vodivost k
	částice <4 mm [t·m^{-3}]	částice >4 mm [t·m^{-3}]	d_{max} [t·m^{-3}]	W_{opt} [%]	max [t·m^{-3}]	min [t·m^{-3}]	c_{ef} [kPa]	ϕ_{ef} [°]	[m·s^{-1}]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GW	2,69	2,58	>1,91	<13,0	1,97 - 2,30	1,58 - 1,90	0	44	$5\cdot10^{-4}$ - $7\cdot10^{-5}$
GP	2,68	2,57	>1,76	<13,0	2,10 - 2,30	1,67 - 1,93	0	41	$5\cdot10^{-4}$ - $6\cdot10^{-5}$
G - F	2,70	2,50	>1,74	<13,5	-	-	0	38	$1\cdot10^{-6}$ - $5\cdot10^{-8}$
GM	2,73	2,43	>1,80	<20,5	2,06 - 2,16	1,70 - 1,76	5	34	$8\cdot10^{-5}$ - $8\cdot10^{-10}$
GC	2,73	2,57	>1,84	<17,7	-	-	5	27	$1\cdot10^{-4}$ - $1\cdot10^{-9}$
SW	2,67	2,57	1,92 - 2,11	7,4 - 10,8	1,90 - 2,10	1,48 - 1,71	0	41	$5\cdot10^{-5}$ -$4\cdot10^{-6}$
SP	2,65	2,62	1,70 - 2,00	8,8 - 12,8	1,73 - 1,96	1,35 - 1,64	0	37	$2\cdot10^{-4}$ - $1\cdot10^{-6}$
S - F	2,66	2,45	1,74 - 1,83	11,8 - 14,2	-	-	0	33	$1\cdot10^{-5}$ - $1\cdot10^{-7}$
SM	2,68	2,48	1,72 - 2,01	9,1 - 15,9	1,62 - 1,90	1,23 - 1,48	5	34	$1\cdot10^{-5}$ - $1\cdot10^{-10}$
SC	2,69	2,47	1,81 - 2,00	10,0 - 14,7	-	-	6	34	$1\cdot10^{-7}$ - $5\cdot10^{-10}$
ML	2,69	-	1,49 - 1,82	14,0 - 25,0	-	-	12	34	$5\cdot10^{-7}$ - $1\cdot10^{-10}$
CL	2,71	-	1,66 - 1,84	14,0 - 19,0	-	-	25	25	$1\cdot10^{-7}$ - $1\cdot10^{-10}$
MH	2,79	-	1,33 - 1,40	33,0 - 35,0	-	-	20	18	$8\cdot10^{-9}$ - $1\cdot10^{-10}$
CH	2,73	-	1,42 - 1,63	19,5 - 30,5	-	-	20	17	$4\cdot10^{-7}$ - $2\cdot10^{-10}$



Obr. 2.6 Mezní křivky zrnitosti zemin vhodných pro budování zemních přehradních hrází [Kratochvíl a Stara, 1990)]

Pro výstavbu hrází MVN je možné použít různé soudržné i nesoudržné zeminy (Doležal a kol., 2011). Při návrhu tělesa hráze je nutné vycházet především z materiálů, které jsou v dané lokalitě dostupné. Na základě informací z provedeného inženýrsko-geologického průzkumu o vlastnostech a dostupnosti zemin je navržen jeho tvar a složení. Rozhodujícím parametrem zeminy je stupeň nasycení, který lze vyjádřit rovnicí

$$S_r = \frac{\rho'_s \cdot (\rho' - \rho'_d)}{\rho'_w \cdot (\rho'_s - \rho'_d)}, \tag{2.1}$$

kde ρ'_s je měrná hmotnost zeminy [kg·m^{-3}], ρ' objemová hmotnost zeminy [kg·m^{-3}], ρ'_d objemová hmotnost vysušené zeminy [kg·m^{-3}] a ρ'_w měrná hmotnost vody [kg·m^{-3}].

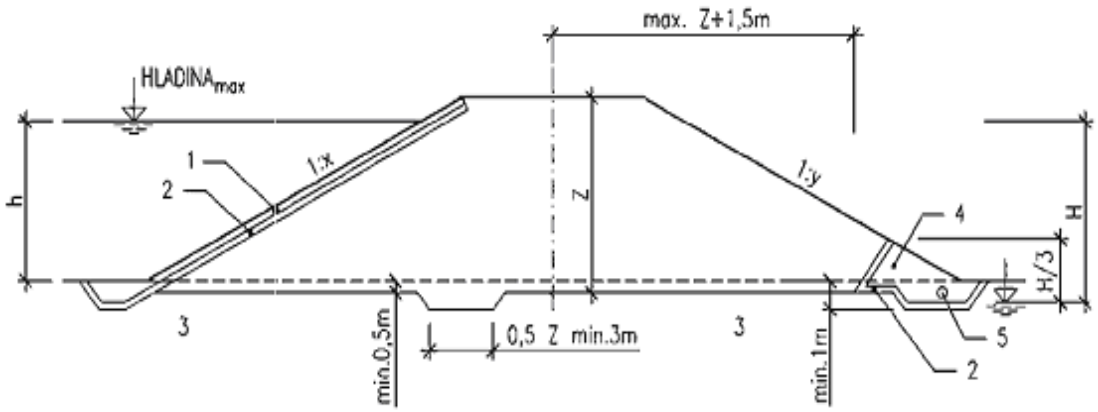
2.3.2 Homogenní zemní hráz

Homogenní (stejnorodé) zemní hráze jsou takové, které v příčném profilu nejsou děleny na zóny, jsou vystavěny z jednoho materiálu, který musí být přiměřeně nepropustný a konstrukčně stálý (ČSN 75 2410).

Zeminy použité pro stavbu homogenní hráze by měly splňovat následující požadavky:

- čára zrnitosti leží v oblasti 1, případně 2 dle obr. 2.6
- obsah organických látek nepřesahuje 5 %,
- mez tekutosti není vyšší než 50 %,
- maximální průměr zrna zeminy je 100 mm,
- u zemin skupiny ML, CL, CS a MS je index plasticity $I_p = w_l - w_p > 8$.

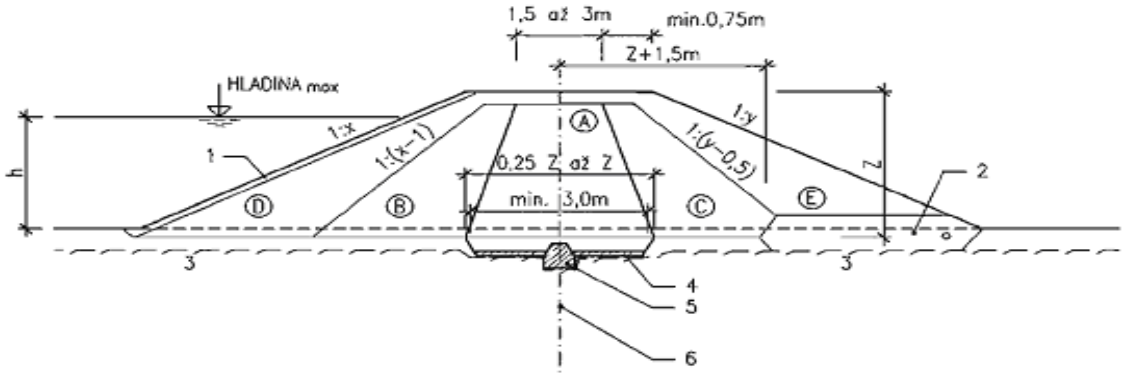
Tento typ hráze se doporučuje požívat jen pro hráze, jejichž výška nepřesahuje 6 m (ČSN 75 2410). Příčný profil homogenní hráze je patrný z obr. 2.7.



Obr. 2.7 Homogenní hráz na nepropustném podloží (1 - opevnění, 2 - filtr, 3 - nepropustné podloží, 4 - patní drén, 5 - drenážní potrubí) (ČSN 75 2410)

2.3.3 Nehomogenní zemní hráz

Těleso nehomogenní (zonální) hráze je tvořeno dvěma nebo více druhy zemin, které jsou uloženy odděleně (ČSN 75 2410). Příčný profil nehomogenní hráze je znázorněn na obr. 2.8. Zóna A je stabilizační, zóna B a C přechodová stabilizační a zóna D a E propustná stabilizační.



Obr. 2.8 Nehomogenní hráz se středním těsněním (1 – opevnění, 2 – drenážní prvek, 3 – skalní podloží, 4 – betonová vyrovnávací vrstva, 5 – betonová zavazující ostruha, 6 – těsnící prvek v podloží) **(ČSN 75 2410)**

Těsnění nehomogenní hráze se navrhuje střední nebo návodní, většinou z nepropustných zemin, výjimečně bývají použity jiné materiály, např. asfalt, beton nebo železobeton (Doležal a kol., 2011). Zeminy pro těsnicí část nehomogenní hráze by měly splňovat stejné podmínky jako zeminy pro stavbu homogenní hráze. Pro stabilizační část by měly být použity zeminy o zrnitosti materiálu v oblasti 4, případně 3 dle obr. 2.6, sypanina musí i po zhutnění zůstat propustná, objemově stálá vůči vlivům počasí a nesmí obsahovat organické látky.

Vhodnost zemin pro stavbu různých zón hrází je uvedena v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází (ČSN 75 2 410) (ČSN 75 2410)

Znak skupiny	Homogenní hráz	Těsnicí část	Stabilizační část
GW	nevhodná	nevhodná	výborná
GP	nevhodná	nevhodná	výborná
G - F	málo vhodná	nevhodná	velmi vhodná
GM	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
GC	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
SW	nevhodná	nevhodná	vhodná
SP	nevhodná	nevhodná	vhodná
S - F	nevhodná	nevhodná	vhodná
SM	vhodná	vhodná	málo vhodná
SC	velmi vhodná	výborná	nevhodná
MG	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
CG	velmi vhodná	výborná	nevhodná
MS	vhodná	vhodná	nevhodná
CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
ML-MI	málo vhodná	vhodná	nevhodná
CL-CI	vhodná	velmi vhodná	nevhodná
CH-ME	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
CH-CE	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná

2.4 FUNKČNÍ OBJEKTY MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Součástí malých vodních nádrží jsou funkční objekty, které umožňují plnění funkcí spojených s provozem nádrže (Šálek, 1996). Rozdělují se na objekty výpustné, odběrné, bezpečnostní, sdružené a speciální.

2.4.1 Výpustná zařízení

Výpustná zařízení MVN slouží jednak k udržení hladiny normálního nadržení na požadované výšce, jednak v případě potřeby k úplnému vyprázdnění nádrže (Vrána a Beran, 2008). Musí být dimenzováno a osazeno tak, aby umožňovalo bezpečné vypuštění vody z nádrže za všech situací a v případě potřeby umožnilo vypustit všechnu vodu v požadovaném čase. Z důvodu vypouštění veškeré vody se výpustné zařízení obvykle umisťuje do nejnižšího místa nádrže (pokud to umožňuje geologická stavba podloží). Výpustným objektem musí být vybaveny všechny MVN. Nádrže s objemem zásobního prostoru nad 1 mil. m^3 by měly být vybaveny dvěma výpustnými zařízeními.

Výpustný objekt se skládá z vtokové části, výpustné části a vývaru (Šálek, 2001). Vtoková část bývá opatřena česlemi a uzávěrem, výpustné potrubí prochází celým tělesem hráze a navrhuje se tak, aby v něm vzniklo proudění o volné hladině. Nejpoužívanějšími

typu uzávěrů jsou například šoupátka, segmenty, stavidla a požeráky (Vrána a Beran, 2008).

2.4.2 Bezpečnostní objekty

Bezpečnostní objekty tvořené bezpečnostními přelivy slouží k neškodnému převedení povodňových průtoků, ochraně zemních hrází MVN proti přelití a ochraně území pod hrází před možnými škodami vzniklými přelitím nebo protržením hráze (Vrána a Beran, 2008). Přelivy bývají zpravidla nehrazené, navrhují se na hodnotu Q_{100} u všech průtočných nádrží, v případě neprůtočných je možné navrhovat kapacitu bezpečnostního objektu na sníženou maximální hodnotu možného přítoku do nádrže (ČSN 75 2410). Při výpočtu se neuvažuje retenční účinek nádrže. Hrazený přeliv je možné použít pouze v odůvodněných případech, a je-li na hrázi stálá obsluha.

Podle směru proudění vody se rozlišují bezpečnostní přelivy čelní a boční, podle půdorysného uspořádání přelivné hrany přímé a zakřivené a podle konstrukčního uspořádání kruhové, břehové, šachtové, kašnové, žlabové, násoskové, doplňkové a nouzové (Šálek, 1997).

Boční bezpečnostní přelivy jsou umístěny v boku nádrže, přelivná hrana bývá kolmá na osu hráze (Vrána a Beran, 2008). Skládají se z vlastní přelivné hrany, spadiště, skluzu, vývaru a odpadního koryta od skluzu, které je pod hrází napojeno na stávající koryto toku.

Korunové bezpečnostní přelivy mají přelivnou hranu rovnoběžnou s osou hráze (Šálek, 1997). Vyskytují se zejména na starších zemních hrázích. Korunový přeliv je vytvořen snížením a opevněním koruny a vzdušného líce hráze.

Kašnové bezpečnostní přelivy se navrhují v případech, kdy je přelivná hrana příliš dlouhá, aby bylo možné použít čelní korunový přeliv (Vrána a Beran, 2008). Podmínkou jsou příznivé základové poměry. Přelivná hrana je v půdoryse tvořena lomenou čarou, půlkružnicí, kombinací kružnice a přímky apod. Kašnový přeliv je tvořen tělesem přelivu, spadištěm, a odpadním korytem napojeným na koryto pod hrází. V některých případech se kombinuje kašnový přeliv s objektem výpusti.

Šachtové bezpečnostní přelivy se na malých vodních nádržích používají velmi zřídka (Vrána a Beran, 2008). Jsou tvořeny svislým válcovým tělesem, které v dolní části přechází pravoúhlým kolenem do odpadního potrubí. Profil odpadního potrubí musí být navržen tak, aby v něm bylo zajištěno proudění o volné hladině. Podmínkou pro použití tohoto typu bezpečnostního objektu je únosné skalní podloží v místě založení.

Mezi **speciální bezpečnostní přelivy** řadíme především přelivy nouzové (Vrána a Beran, 2008). Účelem je snížení zatížení hlavního přelivu po relativně krátkou dobu průchodu kulminačního průtoku. Nouzové přelivy se navrhují na nižší návrhový průtok

a úroveň přelivné hrany bývá výše než u hlavního přelivu. Zřizují se dodatečně buď přímo v průběhu povodně, nebo na základě zkušeností s průchodem povodňové vlny v minulosti.

2.4.3 Odběrná zařízení

Odběrná zařízení jsou navrhována podle účelu a provozně-technických podmínek odběru vody (např. pro závlahy, pro průmysl apod.) (Vrána a Beran, 2008). Odběry bývají gravitační, případně s čerpáním, s konstantním nebo proměnným množstvím odebírané vody, regulovatelné nebo neregulovatelné. Odběr může probíhat z úrovně hladiny nebo je umožněn odběr z různých hloubek dle potřeby. Těmto podmínkám se přizpůsobuje technické řešení a vybavení odběrného zařízení – druhy uzávěrů, česlové stěny, opatření pro zimní provoz atd.

2.4.4 Sdružené objekty

Sdružené objekty na malých vodních nádržích plní funkci přelivů a odběrných a výpustných zařízení. Přelivy těchto objektů bývají nejčastěji žlabové a šachtové (ČSN 75 2410). Při návrhu sdruženého objektu je vždy nutné zohlednit jeho technickou, provozní a ekonomickou vhodnost.

2.4.5 Speciální objekty

Speciální objekty na malých vodních nádržích souvisí s účelem nádrže a způsobem jejího využívání (Vrána a Beran, 2008). Jsou tedy různé pro různé typy nádrží. Například na rybochovných nádržích se navrhují loviště, kádiště a česlové stěny, dále přístupová schodiště a rampy a příjezdová komunikace. Na nádržích sloužících k úpravě vlastností vody bývají osazena zařízení pro rovnoměrné napouštění, vypouštění a rozdělování vody, provzdušnění a umožnění vjezdu do nádrže při jejím odkalování.

3 PORUCHY HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Výstavba jakékoli hráze s sebou vždy nese určité riziko porušení (Jandora a Říha, 2002). Ani sebelepší návrh nikdy nemůže zajistit úplnou bezpečnost vodního díla. Porušením hráze vzniká povodňová vlna, která může způsobit v prostoru pod hrází velké škody, které mnohdy přesáhnou cenu vodního díla. Statistika poruch MVN nebyla dosud zpracována. Poruchy menších děl často nejsou hlášeny a díla v soukromém vlastnictví mnohdy nejsou po protržení opět uvedena do provozu (Doležal a kol., 2011). K porušení zemních hrází dochází nejčastěji v důsledku jejich přelití a filtračních deformací.

3.1 PŘÍČINY PORUCH

Analýza porušení hrází MVN ukazuje zejména na následující příčiny (Doležal a kol., 2011):

- vady projektové dokumentace;
- nekvalitní výstavba, materiály, hutnění apod.;
- provozní okolnosti jako stárnutí konstrukcí, nedostatečná údržba, výkon TBD, mimořádné situace, chybějící nebo špatné manipulační řády.

Vady projektové dokumentace zahrnují nedostatečné podklady, zejména geologické, hydrologické, inženýrsko-geologické a hydrogeologické, dále nedostatky ve výpočtech, zejména špatný návrh bezpečnostních objektů, chybné geotechnické výpočty a statické výpočty, návrh velkého sklonu svahů hráze, připouštění přelévaní koruny hráze apod. (Doležal a kol., 2011).

Nekvalitní výstavbou je míněno nedodržení návrhu, tj. rozměrových parametrů, nedodržení výškových úrovní (koruny hráze, přelivné hrany,…), porušování technologické kázně, zejména nedodržování předepsaných vlastností zemin, zanedbaný autorský dozor a dozor investora, apod. (Doležal a kol., 2011).

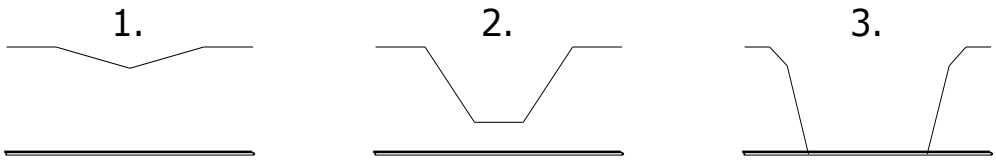
Údržba, bezpečný provoz a výkon TBD zvláště u drobných a soukromých subjektů naráží na nedostatek financí (Doležal a kol., 2011). Díla jsou neudržovaná a ve špatném technickém stavu. U funkčních objektů často chybí ovládací prvky, česle jsou neprůtočné a v řadě případů se objevují koncentrované průsaky.

3.2 ZPŮSOBY PORUŠENÍ ZEMNÍCH HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Poruchy zemních hrází malých vodních nádrží lze rozdělit na poruchy způsobené erozivní činností proudu vody, filtračními deformacemi, ztrátou stability, aj. (Jandora a Říha, 2002). Tyto typy poruch spolu mnohdy vzájemně souvisejí a v praxi se projevují současně nebo vyvolávají jedna druhou.

3.2.1 Erozivní činnost proudu vody

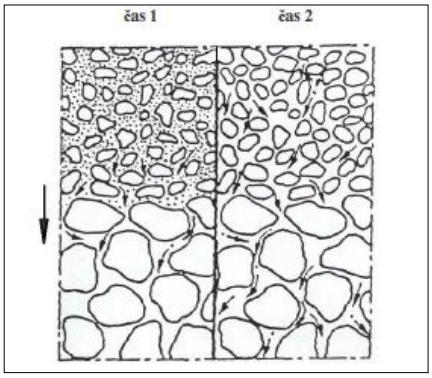
Pouchy tělesa zemní hráze způsobené erozivní činností proudu vody lze rozdělit na poruchy způsobené přelitím, působením vln, vodním proudem a povrchovou erozí při intenzivním dešti (Jandora a Říha, 2002). Zemní hráze zpravidla nejsou navrhovány jako přelévané, mají pouze omezenou odolnost proti porušení povrchovou erozí. V případě nedostatečného opevnění návodního líce může dojít k jeho abrazi působení větrových vln. V důsledku nedostatečné kapacity skluzu pod bezpečnostním přelivem nebo kapacity odpadního koryta může dojít k podemletí vzdušné paty hráze. Postup porušení zemní hráze v důsledku přelití je znázorněn na obr. 3.1.



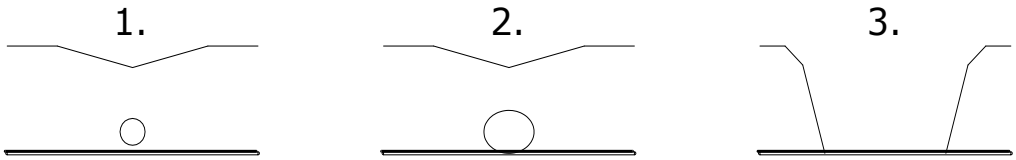
Obr. 3.1 Potup porušení sypané zemní hráze v důsledku přelití (Jandora a Říha, 2002)

3.2.2 Filtrační deformace

Porucha zemní hráze v důsledku filtrační deformace nastává v případě nekontrolovaného průsaku tělesem hráze, případně jejím podložím (Jandora a Říha, 2002). Mechanizmem vedoucím k poruše může být prolomení těsnicího prvku nebo sufoze (vnitřní, vnější nebo kontaktní), tedy vyplavování jemnozrnných částic vedoucí ke zvýšení propustnosti materiálů hráze a narušení jejich struktury. K prolomení těsnicího prvku může vést jeho oslabení kontaktní sufozí, činností zvířat, nebo vlivem odumírajících kořenů stromů po jejich vykácení. Tyto okolnosti mohou vést ke vzniku tzv. privilegovaných cest tělesem hráze nebo jejím podložím. Mechanizmus kontaktní sufoze je znázorněn na Obr. 3.2 a postup porušení zemní hráze v důsledku sufoze je patrný z Obr. 3.3.



Obr. 3.2 Mechanizmus kontaktní sufoze (Říha, 2008)



Obr. 3.3 Postup porušení zemní hráze v důsledku filtrační deformace (Jandora a Říha, 2002)

3.2.3 Další příčiny poruch

K dalším možným příčinám poruch zemních hrází patří ztráta stability (Jandora a Říha, 2002). Může mít formu sesuvu návodního nebo vzdušného svahu hráze. Sesuv návodního svahu může způsobit náhlá změna hladiny vody v nádrži. Těleso zemní hráze je možné zpevnit výsadbou stromů nebo keřů, které svými kořeny zvýší její stabilitu, ale kořeny často vedou k porušení hráze filtrační deformací a případné vývraty mohou způsobit nátrže na svazích hráze.

Pro zvýšení bezpečnosti provozu malých vodních nádrží je v poslední době kladen důraz na monitorování jejich zemních hrází s dopadem na včasnou identifikaci nežádoucích jevů a odstranění problémů.

4 MONITOROVÁNÍ HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Je mnoho důvodů proč a způsobů jak provádět hodnocení bezpečnosti provozu zemních sypaných hrází malých vodních nádrží. Pokud byla při inženýrsko-geologickém průzkumu (IGP) stanovena riziková místa nebo se objevila při provozování vodního díla, je vhodné vědět, jak se mění vlastnosti zeminy v průběhu jejího zatěžování běžnými, resp. v dané lokalitě obvyklými i extrémními vlivy (sucho, extrémní srážky, extrémní úroveň vodní hladiny a další).

Rozsah a četnost monitorování hrází vyplývá z jejich zařazení do kategorie z hlediska technickobezpečnostního dohledu a je dán Vyhláškou č. 471/2001 Sb. Ministerstva zemědělství o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly. Zemní hráze MVN bývají řazeny do IV. kategorie. Pro tuto kategorii je povinné provádět pouze obchůzku jedenkrát měsíčně. Obchůzka zahrnuje sledování vodního díla a jeho blízkého okolí, průtokových poměrů, výskytu trhlin a viditelných deformací, posunů a sesuvů, průsaků, vývěrů, zamokřených ploch, vlivů provozu a prostředí na technický stav objektů a technologických zařízení, zvláště konstrukcí výpustných, přelivných a odběrných zařízení (Vyhláška č. 471/2001 Sb.). Měření se zavádí jen k objasnění jevů nebo skutečností, které nebylo možné předvídat.

Pokud byla při IGP nalezena riziková místa v tělese zemní hráze, je možné pro její monitorování zvolit

- přímé metody,
- nepřímé metody.

Přímé měřicí metody využívají především geologické sondování, a to jak ruční, tak mechanické, kdy dojde k vytvoření šachty, štoly, odkryvu nebo odebrání vzorku k laboratornímu rozboru. Metody přímé jsou destruktivní. Při jejich aplikaci může dojít k nevhodnému zásahu do konstrukce zemní hráze, který může mít negativní následky. Hodnota sledované veličiny se zjišťuje přímo měřením.

Vedle vizuální kontroly zemních hrází MVN se stále častěji uplatňují nepřímé monitorovací metody. S rozvojem technologií založených na elektrických prvcích je v posledních letech zaznamenán i vývoj měřicích aparatur a elektrických monitorovacích metod. Nepřímé měřicí metody se řadí do kategorie nedestruktivních metod, které jsou šetrnější ke konstrukci zemní hráze. Metody využívají znalosti reakce konstrukčních materiálů hráze na různé podněty. Proměnlivost elektrického odporu, rychlost šíření seismických impulsů a další měřené parametry umožňují vymezit geometrii rozhraní a bloků mechanicky a geneticky různých materiálů. Hodnota sledované veličiny se získá

z měření veličin vázaných s měřenou veličinou známým vztahem a provedených přímými měřicími metodami.

4.1 GEOFYZIKÁLNÍ METODY

Geofyzika a její průzkumné metody představují multidisciplinární vědní obor, který se zabývá studiem fyzikálních polí zemského tělesa, sledováním jejich vývoje a zákonitostí (Ochaba, 1986). Původně byla jednou ze součástí geologie, v průběhu 20. století se však stala samostatným vědním oborem (Telford, 1990). Geologická stavba zemské kůry a svrchní vrstvy zemského pláště jsou předmětem zájmu aplikované geofyziky, která řeší konkrétní otázky a problémy související s potřebami a činností lidské populace. Jedná se zejména o vyhledávání ložisek nerostných surovin, řešení geoekologické, inženýrskogeologické, hydrogeologické problematiky atd. (Ochaba, 1986). Geofyzikální metody průzkumu tvoří velmi rozsáhlý komplex různých metod, jejich variant a modifikací. Podstatou geofyzikálních metod je schopnost detekce nehomogenit v rozložení fyzikálních polí Země, protože ze změn fyzikálních polí Země je možno usuzovat na nehomogenity v zemské kůře (Kearey a kol., 2002)

Základní dělení geofyzikálních metod průzkumu vychází z fyzikálních principů a charakterů studovaných polí

- gravimetrické metody – studují rozložení tíhového pole Země,
- magnetometrické metody – studují rozložení magnetického pole,
- geoelektrické metody – studují rozložení geoelektrických polí,
- radionuklidové metody – studují přirozené a umělé radioaktivní pole,
- geotermické metody – studují tepelné pole,
- seismické metody – studují pole seismických vlnění (Kearey a kol., 2002; Telford, 1990).

Další dělení geofyzikálních metod je možno vztáhnout k pozici měření, tj. zda se měří na zemském povrchu, v podzemí, ze vzduchu, z mořské hladiny nebo pod ní, ve vrtech apod. Geofyzikální metody mohou být také seskupovány do metodických celků, kde hlavním kritériem výběru vhodných metod a metodik je oblast použití, např. geofyzikální metody vhodné při ložiskovém průzkumu, geofyzikální metody v geomorfologii, inženýrské geologii, hydrogeologii atd. (Sheriff, 1989). Geofyzikální metody v geomorfologii napomáhají poznání geologické stavby horninového prostředí, umožnují prostorové vymezení kvazihomogenních celků, umožňují sledovat změny v rozložení fyzikálních polí, apod. Za nejčastěji používané a nejlépe metodicky propracované je možné považovat geoelektrické a seismické metody, v posledních letech se do popředí zájmu dostávají metody dálkového průzkumu Země (Kearey a kol., 2002; Sheriff, 1989; Telford, 1990).

4.1.1 Geofyzikální metody používané k monitorování zemních hrází malých vodních nádrží

Vzhledem k rychlému rozvoji a velkému množství výrobců přístrojů využívajících geofyzikálních metod se v publikacích vyskytují odlišné názvy, ty zde uvedené vychází převážně z (Horský a Bláha, 2011). Při sledování vodního díla v průběhu jeho provozu se velmi často používají geoelektrické metody, jako jsou

- vertikální elektrické sondování,
- odporové profilování,
- multielektrodové profilování,
- elektromagnetické profilování,
- georadar,
- spontánní polarizace,
- metoda velmi dlouhých vln.

Ze skupiny seizmických metod je to

- mělká refrakční seizmika,
- seizmická tomografie,
- akustická měření,
- a další.

Mezi využívané gravimetrické metody patří

- profilová měření,
- zjišťování objemové hmotnosti.

Používané karotážní metody jsou

- karotážní měření pro zjištění mechanických vlastností,
- hydrogeologická karotáž,
- přesná inklinometrie,
- optická dokumentace vrtů,
- a další.

Magnetometrické metody

- profilová měření,
- zjišťování susceptibility.

Další metody

- termická měření,
- radiometrická měření,
- dálkový průzkum a letecká geofyzika.

V souvislosti se sledováním změn obsahu vody s cílem určení anomálií v tělese zemní hráze se především využívají

- (dipólové) elektromagnetické profilování,
- geologický průzkum geofyzikálními radary (georadary),
- elektrická impedanční spektrometrie (odporové profilování),
- spontánní polarizace,
- vertikální odporové sondování,
- symetrické odporové profilování.

Diplomová práce je zaměřená na způsob monitorování zemních hrází MVN metodou elektrické impedanční spektrometrie (EIS) s využitím přístroje Z-metr rozvíjenou v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně. Konkrétně se jedná o monitorování zemní hráze vodního díla Hornice.

5 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

Elektrická impedanční spektrometrie (EIS) je nepřímá měřicí metoda využívající měření elektrické impedance k posuzování charakteristik zemin (Pařílková a kol., 2014). Umožňuje sledovat jevy podmíněné změnou elektrické vodivosti zemin, kterou vyvolává změna obsahu vody v zemině nebo změna elektrických vlastností vody.

Zdrojem budicí energie pro sledování zemin je střídavý harmonický elektrický proud. Každá zemina se projevuje určitým elektrickým odporem vůči průchodu elektrického proudu (Pařílková a kol., 2012).

Základním principem metody EIS je měření charakteristiky elektrické impedance **Z** zemin, kterou lze vyjádřit Ohmovým vztahem pro střídavé obvody, tedy poměrem fázoru elektrického napětí **U** a fázoru elektrického proudu **I** (Pařílková, 2013).

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}}\ [\Omega], \tag{5.1}$$

kde fázor elektrického napětí **U** je vyjádřen ve voltech [V] a fázor elektrického proudu **I** v ampérech [A].

Elektrická impedance je komplexní veličina charakterizovaná dvěma složkami, reálnou a imaginární (Pařílková a kol., 2012). Reálnou složku tvoří elektrický odpor *R* (rezistance), který se nemění v závislosti na frekvenci budicího signálu a charakterizuje např. stupeň nasycení zeminy vodou, teplotu, celkový obsah rozpustných solí apod. Imaginární složka je zdánlivý odpor zeminy, reaktance ***X***, která se v závislosti na frekvenci mění a souvisí se strukturou zemin. Elektrickou impedanci lze zapsat v algebraické formě

$$\mathbf{Z} = R + jX\ [\Omega], \tag{5.2}$$

kde *j* je imaginární číslo [-] a ostatní veličiny jsou vyjádřeny v ohmech [Ω].

Modul elektrické impedance (absolutní hodnota elektrické impedance) lze vyjádřit užitím Pythagorovy věty ve tvaru:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}\ [\Omega], \tag{5.3}$$

kde jsou všechny veličiny vyjádřené v ohmech [Ω]. Fázový posun $\boldsymbol{\varphi}$ je vyjádřen vztahem

$$\varphi = arctg\left(\frac{X}{R}\right)\ [-]. \tag{5.5}$$

Rezistivita ρ, specifický elektrický odpor, charakterizuje elektrický odpor vodiče jednotkové délky a jednotkové plochy kolmého průřezu. Je dána vztahem

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \, [\Omega \cdot \mathrm{m}], \tag{5.6}$$

kde R je elektrický odpor [Ω], A [m^2] průřezová plocha vodiče a l délka elektrického vodiče tvořeného zeminou resp. vzdálenost elektrod [m] snímače metody EIS.

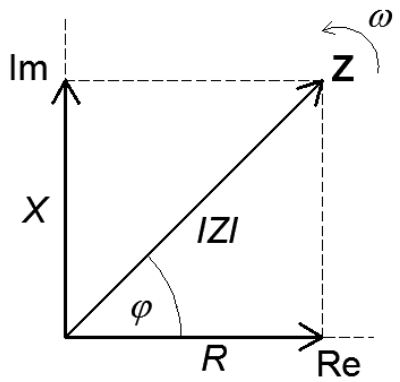
Inverzní hodnotou k elektrické impedanci **Z** je admitance **Y** [S], která popisuje elektrickou vodivost prostředí,

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} \, [\mathrm{S}]. \tag{|5.7}$$

Schopnost látky vést elektrický proud je charakterizována konduktivitou σ [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ resp. $S \cdot m^{-1}$], což je inverzní hodnota rezistivity,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \, [\mathrm{S} \cdot \mathrm{m}^{-1}]. \tag{5.8}$$

Fázor elektrické impedance **Z** je možné vyjádřit také graficky (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Grafické znázornění fázoru elektrické impedance

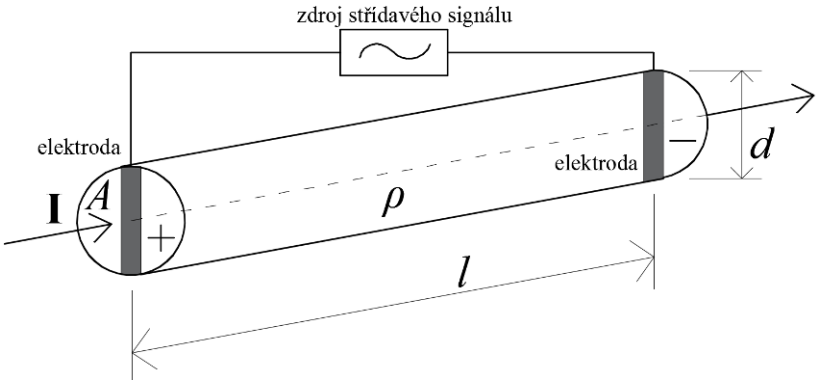
Pro stanovení elektrické impedance byly v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb řešením projektů Grantové agentury ČR a mezinárodních projektů programu EUREKA sestrojeny měřicí přístroje Z-metr první až čtvrté generace s příslušenstvím. Z-metr I se používá pro měření v laboratorních podmínkách, s přístroji Z-metr II až IV je možné pracovat jak v podmínkách laboratorních, tak polních. Data zpracovaná v mé diplomové práci jsou změřena přístrojem Z-metr IV (Obr. 5.3).

5.1 PRINCIP MĚŘENÍ METODOU EIS

Měření elektrické impedance **Z** zeminy vychází z paralelního umístění dvou elektricky vodivých elektrod do zeminy ve vzdálenosti *l*, která by z důvodu omezení vlivu geoelektromagnetického pole Země neměla přesáhnout 2 m. Dvě elektrody délky *d* tvoří jeden snímač sondy EIS. Střídavý elektrický proud procházející zeminou mezi elektrodami v ní generuje elektrické pole. Zemina však průchodu elektrického proudu klade elektrický odpor, což vyjadřují měřené složky elektrické impedance **Z**.

Zemina se obecně považuje za špatný elektrický vodič, je-li v suchém stavu. Proto u suché zeminy bude reálný elektrický odpor velký. Bude-li naopak zemina vlhká nebo v ní budou póry s obsahem vody či elektricky vodivých iontů, elektrický odpor bude menší a zemina povede lépe elektrický proud. Stane se tak elektrickým vodičem, jehož plocha *A* je určena délkou elektrod *d* (Obr. 5.2).

Dle možností a potřeb sledování je měření možno realizovat na jedné dělené tyčové sondě, kdy je nezbytné využití adaptéru, nebo jako paralelní zapojení dvou elektrod (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Schéma měření pro určení elektrických parametrů zeminy

5.2 PŘÍSTROJ Z-METR IV

Přístroj Z-metr IV je již čtvrtou generací přístroje Z-metr (Pařílková, 2013). Byl navržen pro měření elektrické impedance v rámci projektů programu EUREKA. Hlavním rozdíl oproti přístroji předchozí generace představuje možnost bezdrátové komunikace mezi přístrojem a uživatelem.

Obr. 5.3 Přístroj Z-metr IV, příklad konstrukce sond a jejich instalace

Jádro Z-metru IV je tvořeno 32 bitovým výkonným mikroprocesorem s jádrem Cortex-M3 (Pařílková, 2013). Mikroprocesor pracuje na frekvenci 120 MHz a má kapacitu 1 MB paměti flash a 128 kB paměti RAM. Zdrojem energie jsou dva dobíjecí průmyslové akumulátory typu Li-Ion. Kapacita baterie je dostatečná pro 24-hodinový intenzivní provoz. Dobíjení probíhá pomocí 5V/1A napájecího adaptéru. Pro komunikaci s uživatelem je přístroj vybaven LCD a klávesnicí, z níž je možné nastavení přístroje, a to včetně automatického autonomního provozu.

Hlavním rozhraním je rozhraní Bluetooth, které umožňuje propojení přístroje k ovládání a manipulaci s daty (Pařílková, 2013). Pro budoucí použití je zde také připojení Ethernet a přístroj je také možné stavět u GPS a Wi-Fi modulů. Veškerá data jsou ukládána na SD kartu, která není uživatelsky vyměnitelná, jelikož používání přístroje Z-metr III ukázalo, že to není potřebné. Naměřená data jsou ukládána ve formátu *.csv a přístup k nim je umožněn propojením s počítačem pomocí USB kabelu nebo přes Bluetooth. Zpracování dat se zpravidla realizuje v programu MS Excel.

Na těle Z-metru IV se nachází dva 25 pinové konektory typu CANON, které slouží k připojení měřicích sond.

Tab. 5.1 Základní parametry přístroje Z-metr IV

specifikace elektrické měřicí části	
měřicí rozsah impedance	10 Ω – 1 MΩ
měřicí frekvence	100 Hz – 200 kHz
přesnost modulu Z	±2% z rozsahu
přesnost fáze	±2°
měřicí napětí sinusové s nulovou střední hodnotou	
amplituda měřicího napětí	0,2 V; 1,0 V
interní přepínač	až 16 kanálů
externí přepínač	až 256 kanálů
dlouhodobé měření na jedné lokalitě	maximální vzdálenost mezi sondami a měřicí jednotkou až 60 m (při použití tzv. aktivních sond)
měřicí funkce	bez záznamu dat, manuální ovládání, automatické ovládání
volitelné automatické spouštění – vestavěnou klávesnicí nebo externě z mobilní aplikace	
možnost připojit sadu čidel pro měření teplot	
specifikace komunikace s okolím	
základní komunikační rozhraní	USB 2.0, SD karta, Bluetooth
výstupní formát datového souboru	standardní "*.csv"
možnost připojit GSM modem pro dálkový přenos dat a dálkové ovládání přístroje	
možnost připojit a zpracovávat i další zákaznická čidla (po úpravě HW a SW přístroje) - nutno konzultovat (např. snímač výšky hladiny)	
napájení	
napájení	bateriové s dobíjecími články
doba kontinuálního provozu [h]	16
napájecí napětí [V]	3,7
maximální napájecí napětí [V]	5

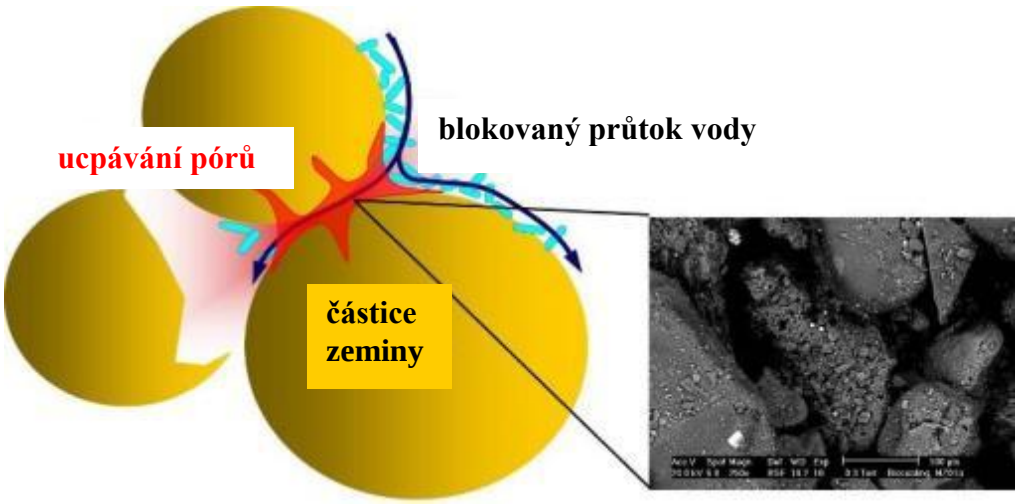
6 ZPŮSOBY SANACE ZEMNÍCH HRÁZÍ MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ

Sanace průsaků zemních hrází se v současné době provádí nejčastěji pomocí stavebních postupů speciálního zakládání. Utěsnění je prováděno z koruny hráze a používají se převážně 2 metody (Rupp, 2016). První možností je výstavba těsnicí clony. Pomocí drapákové soustavy se do tělesa hráze zahloubí dvě řady lamel do požadované hloubky a prostor mezi nimi je následně pomocí injektáže vyplněn a tvoří tak nepropustnou přepážku bránící průsakům. Místo lamel je možné vybudovat těsnicí stěnu pomocí řady vrtů z koruny hráze, které jsou také následně vyplněny těsnicí směsí. Vrty jsou prováděny s mezerou mezi sebou, která je následně opět navrtána tak, že vzniklý vrt zasahuje do obou sousedních. Následně je vyplněn a zajišťuje tak nepropustnost hráze. Pro výše popsané metody se používají různé těsnicí směsi tvořené cementem a jílovitými materiály.

Metody speciálního zakládání jsou však poměrně finančně i technologicky náročné a mohou být problematické z hlediska ekologie, proto se tato oblast stále rozvíjí a hledají se nové možnosti sanace vodních děl. Jednou z inovativních metod rekonstrukce zemních těles je metoda s názvem BioSealing.

6.1 BIOSEALING

V roce 1980 vědci pracující na projektech zabývajících se otázkou bio sanačních technologií pozorovali, že pokud se injekčně aplikují živiny stimulující růst bakterií obsažených v zeminách, mohou biochemické reakce vést k místnímu ucpání pórů a snížit tak propustnost sanovaných látek či ovlivnit transport kontaminovaných látek (Obr. 6.1).



Obr. 6.1 BioSealing je založen na kombinaci mikrobiologických a biochemických procesů

První zmínky o principu metody BioSealing a možnosti jejího využití byly zveřejněny v roce 2004 (Lambert a kol., 2004; Koros a kol., 2014) a metoda BioSealing se zařadila mezi metody vhodné pro sanaci poruch vodních děl. Využívá možnost zamezení průsaku vody skrze zemní konstrukce pomocí stimulace biologické aktivity půdy. Jedná se o poměrně novou technologii, která byla vyvinuta nizozemskými společnostmi Deltares a Volker Staal Funderingen. V Nizozemí byla také poprvé testována v laboratoři a následně v terénu (Rupp a kol., 2016). V praxi byla metoda BioSealing úspěšně použita pro utěsnění průsaků podzemní vody na severojižní lince metra v Amsterdamu a podél kanálů Dunaje prováděla touto technologií v rámci výzkumu těsnící práce firma Züblin Spezialtiefbau. Těmito praktickými aplikacemi byla prokázána funkčnost a účinnost metody.

6.2 PRINCIP METODY BIOSEALING

Jak již bylo řečeno, metoda BioSealing spočívá v možnosti stimulace biologické aktivity a využívá přítomnosti bakterií, které se přirozeně vyskytují v půdním horizontu (Rupp a kol., 2016). Množství a druh těchto bakterií je dán vlastnostmi zemin, jako je hodnota pH, teplota vody v zemině nebo obsah solí. Jejich aktivita je stimulována pomocí injektování živin poblíž místa průsaku. Voda proudící zeminou automaticky dopraví živiny k místu největšího průsaku. V průběhu transportu živin také dochází ke změnám v chemismu půdy, což vede k uvolnění jílovitých částic a jejich unášení vodním proudem.

Největší část živin je dopravena do místa průsaku a množství bakterií zde přítomných vzroste (Rupp a kol., 2016). Bakterie produkují sliz (šlem), v němž se zachytí erodované částice a dochází k utěsnění průsaku. Přibližně 8 týdnů po injektáži živin začne bakteriální aktivita klesat a vrací se do původního stavu. Jemnozrnné částice zachycené v bakteriálním slizu ale vytvářejí pevné těsnění, které zůstává i po odumření bakterií.

6.3 HODNOTÍCÍ KRITÉRIUM METODY BIOSEALING

Cílem aplikace metody BioSealing je sanace průsaku vody podzemními konstrukcemi (Lambert a kol., 2004). V praxi ale není nutné zastavit průsak úplně, propustnost zemin je možné připustit do té míry, dokud negativně neovlivňuje funkci nebo bezpečnost provozu vodního díla. Proto se nemusí jednat o úplné utěsnění, ale pouze o snížení propustnosti zemin v blízkosti průsaku.

Stupeň snížení propustnosti zemin je popsán *faktorem utěsnění C*:

$$C = \frac{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta h}\right)_{t=0}}{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta h}\right)_{t=t}}, \tag{6.1}$$

kde ΔQ je změna průtoku [m^3/s], Δh je změna tlakové výšky mezi dvěma manometry [m].

Na začátku experimentu je *faktor utěsnění C* roven 1,0. Cílem je zvýšit tuto hodnotu na 5,0 (Lambert a kol., 2004). To znamená, že pokud byla původní hodnota průsaku x m^3/d a vzrostla na hodnotu průsaku $2x$ m^3/d, je cílem metody BioSealing průsak opět snížit. Tedy *faktor utěsnění C* vzroste na 5,0, jestliže snížený průtok bude roven $x + 1/5\ x = 1{,}2$ m^3/d.

6.4 PODMÍNKY APLIKACE METODY BIOSEALING

Pro úspěšnou aplikaci technologie BioSealing je nutné zajistit transport živin do místa průsaku vodním proudem (Rupp a kol., 2016). Z toho důvodu není možné uvedenou technologii použít pro těsnění suchých poldrů. V období aplikace živin musí být nádrž napuštěna minimálně nad úroveň zjištěného průsaku tak, aby docházelo k proudění vody tělesem hráze. Pokud je ale toto zajištěno, není nutné znát přesné místo průsaku a toto nemusí být dobře dostupné. Vlivem proudění vody automaticky dojde k transportu živin tam, kam je třeba.

Minimální teplota potřebná pro zvýšení aktivity půdních bakterií je 5 °C, pro ideální účinek opatření byla ověřena minimální teplota 8 °C (Rupp a kol., 2016). Proces utěsnění se zrychlí, pokud teplota podzemní vody vzroste. Při teplotách nad 30 °C ale hrozí nárůst množství a tím i vlivu patogenních bakterií. Technologie BioSealing byla úspěšně testována v rozmezí pH 5 – 11 a bylo zjištěno, že překážkou není ani slanost vody. Aplikace živného roztoku nenarušuje beton ani cement. V případě znečištění podzemní vody nebo půdy je nutné provést laboratorní testy, které ověří možnosti bakteriální aktivity důležité pro použití metody BioSealing. Bylo ověřeno, že pokud je prostor vyplněn pískem, maximální rozsah průsaku, který je možné utěsnit, je 10 m^2 (za předpokladu sbíhavého proudění vody). Utěsnit lze také pukliny v horninách vyplněné pískem nebo štěrkem. Během výzkumů probíhajících v Kanadě byly úspěšně utěsněny i otevřené pukliny do velikosti 2 mm. Mezerovitost štěrkovitých materiálů o velikosti zrn do 25 mm – 30 mm není překážkou. Z důvodu nízké propustnosti však není možné vstřikovat živiny do jílu nebo rašeliny.

6.5 POUŽITÍ TECHNOLOGIE BIOSEALING V ČESKÉ REPUBLICE

Realizační práce pilotní aplikace technologie BioSealing v České republice s výhradním právem užití včetně monitorování prováděla společnost GEO*test*, a.s. ve spolupráci s Vysokým učením technickým, Fakultou stavební, Ústavem vodních staveb řešením projektů „Zavedení nové technologie zamezující průsakům a únikům vody tělesem přehradních hrází“ (Rupp, 2013) a „Systém sledování vybraných parametrů porézních látek metodou EIS v širokém spektru aplikací“ (Pavlík, 2013; Pařílková, 2013) v letech 2014 až 2016 ve dvou variantách dávkování živin stimulujících růst bakterií obsažených v zeminách a při různých úrovních hladiny vody v nádrži.

Druhá varianta dávkování živin při zvýšené úrovni hladiny vody v nádrži byla realizovaná v roce 2016, monitorování a vyhodnocení bylo kromě výše uvedených projektů dále realizováno řešením projektu „Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti vybraných hydrotechnických konstrukcí“ (Zachoval, 2016) a touto diplomovou prací.

6.5.1 Výběr vhodné lokality

Na výběru vhodné vodní nádrže, jejíž zemní hráz vykazovala průsaky, se podílela společnost VODNÍ DÍLA – TBD a.s., která provádí technicko-bezpečnostní dohled nad vodními díly, a Povodí Moravy, s.p. (Rupp a kol., 2016). Jako první možná lokalita byl vybrán rybník Pstruhovec. Výsledky provedeného hydrogeologického průzkumu však poukázaly na nevhodnost lokality pro aplikaci technologie BioSealing z důvodu charakteru průsaku na rozhraní tělesa hráze a skalního podloží. Jako vhodná lokalita pro realizaci projektu bylo nakonec zvoleno vodní dílo Hornice. Proběhly konzultace s odbornými zástupci společnosti Deltares na metodu BioSealing a na zvoleném vodním díle byla uskutečněna návštěva jejího specialisty. S majitelem vodní nádrže, zemědělským družstvem Dešov, sjednány podmínky pilotní aplikace uvedené metody a uzavřena smlouva o spolupráci.

7 VODNÍ DÍLO HORNICE

7.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ ÚDAJE

Hornice jsou obcí ležící jihozápadně od okresního města Třebíč. Nadmořská výška obce je 443 metrů nad mořem. Obec náleží do správního obvodu obce s rozšířenou působností Moravské Budějovice, vzdálené 11,5 km.

Vodní dílo (VD) Hornice (Obr. 7.1) bylo zkolaudováno 31. 5. 1985 a původně sloužilo jako závlahová nádrž (Rupp, 2013). Voda z nádrže byla odebírána přes akumulační jímku do závlahové stanice (Obr. 7.2) nacházející se v podhrází a odtud odebírána k závlaze přilehlých pozemků. Uvedenému účelu však už řadu let neslouží. V současné době plní pouze funkci retence a akumulace povrchových vod a je využíváno při chovu ryb a kachen místními spolky a sdruženími. Základní údaje o VD Hornice jsou zřejmé z Tab. 7.1.

Obr. 7.1 Situace VD Hornice

Výška hráze nad původním terénem je 8,22 m, výška hráze nad základovou spárou 11,20 m. Výronová plocha na vzdušném líci hráze je zřejmá z Obr. 7.3.

Obr. 7.2 Závlahová stanice

Obr. 7.3 Výronová plocha na vzdušném líci hráze

Jako spodní výpusť a současně k částečné regulaci úrovně hladiny v nádrži slouží armaturní sestava šoupat umístěných v armaturní komoře spodní výpusti. Ta se nachází pod hrází nádrže. Nátokové potrubí z nádrže je provedeno jako ocelové s dimenzí DN 500. V armaturní komoře je možné za pomoci šoupat přesměrovat odtok vody z nádrže buď ocelovým potrubím s dimenzí DN 300 do závlahové stanice, nebo ocelovým potrubím s dimenzí DN 500 do toku Kojatického potoka. Manipulace probíhá otevřením jednotlivých šoupat. Pro regulaci a zachování minimálního průtoku slouží šoupě na obtokovém ocelovém potrubí s dimenzí DN 150, které je umístěno mezi přívodním potrubím z nádrže a odtokovým potrubím do toku Kojatického potoka. Odpadní potrubí je ukončeno na pravé straně ve vývařišti bezpečnostního přelivu.

Bezpečnostní přeliv je proveden jako přímý situovaný u levého zavázání hráze (Hejtman, 2012). Je rozdělen na dvě výškové části. Pro převod menších povodňových vod slouží pomocný bezpečnostní přeliv tvořený betonovým žlabem umístěným v bočním bezpečnostním přelivu. Při větších průtocích voda přetéká přes celý boční bezpečnostní

přeliv. Velký výškový rozdíl je řešen neupraveným kamenným terénem a zdrsněným skluzem, po kterém voda stéká. Pod tímto neupraveným skalním masivem je zhotoveno vývařiště pro utlumení kinetické energie odtékající vody (Obr. 7.4).

Obr. 7.4 Boční a pomocný přeliv (vlevo), zdrsněný skluz a vývar (vpravo)

Tab. 7.1 Základní technické parametry VD Hornice (Hejtman, 2012)

Výškové parametry (BPV):	
kóta koruny hráze	449,29 - 449,53 m.n.m.
kóta dna nádrže	441,20 m.n.m.
kóta hladiny stálého nadržení	444,50 m.n.m.
kóta normální hladiny	447,10 m.n.m.
kóta maximální hladiny	448,30 m.n.m.
Parametry hráze:	
šířka koruny hráze	4,65 – 3,80 m
sklon vzdušného líce hráze	1:2,5
sklon návodního líce hráze	1:2,5
délka hráze	73 m
Parametry zdrže:	
plocha zátopy při provozní hladině	13 750 m^2
objem vody při provozní hladině	96 000 m^3
Spodní výpusť:	
Potrubí ocelové DN 500	délka: 48,0 m
Bezpečnostní přeliv:	
kóta pomocného bezpečnostního přelivu – betonový žlab	447,10 m.n.m.
kóta hlavního bočního bezpečnostního přelivu	447,85 m.n.m.

Od roku 2012, kdy došlo k majetkovému vyrovnání, je majitelem vodního díla Zemědělské družstvo Dešov.

7.2 INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝ PRŮZKUM A SYSTÉM MONITOROVÁNÍ

Průzkum lokality VD Hornice byl zahájen v srpnu 2015 (Rupp a kol., 2016). V první etapě zahrnoval vyhloubení 6 vrtů a 3 kopaných sond. Vrty byly provedeny z koruny hráze do hloubky 10 m, kopané sondy byly vyhloubeny na vzdušním líci hráze do hloubky 1,0 m. Byly odebrány vzorky pro laboratorní analýzy a klasifikace zeminy. Část z odebraných vzorků byla převezena do laboratoří společnosti GEO*test*, a.s. pro ověření fyzikálních a mechanických vlastností zemin, část předána do laboratoří společnosti Deltares pro laboratorní ověření účinku aplikace živného roztoku Nutrolase. Na vzorcích byl zahájen kolonový test pro zjištění filtračního koeficientu, odebraná zemina však nebyla dostatečně propustná, proto nepřinesl žádné konkrétní výsledky. Vzorky zemin byly zaslány také do laboratoří rakouské společnosti Agrana, která vyrábí živný roztok Nutrolase. Tyto analýzy sloužily k testům účinku směsi a modifikaci složení v závislosti na vlastnostech zeminy a složení v ní přítomných bakterií. Na základě výsledků laboratorních testů a zkoušek a po konzultacích s odbornými zástupci uvedených společností bylo navrženo dávkování živné směsi a množství vody pro následné proplachování vrtů.

Tři z realizovaných vrtů byly osazeny pažnicemi a připraveny pro seismické metody geofyzikálního průzkumu (Rupp a kol., 2016). Další tři vrty a kopané sondy byly využity pro vybudování geotechnického monitorování hráze. Ve dvou výškových úrovních do nich byla osazena čidla pro sledování pórových tlaků (piezometry) a teplot. Čidla byla opatřena datovými vodiči, které byly svedeny do místa centrální sběrnice dat.

Obr. 7.5 Provádění vrtných prací z koruny hráze

Ve druhé etapě geotechnického průzkumu byl realizován geofyzikální průzkum za použití seismických a geoelektrických metod (Rupp a kol., 2016). Při seismické metodě byly realizovány řízené odpaly v geofyzikálních vrtech a zjišťována homogenita tělesa hráze. Na základě výsledků z první průzkumné etapy byly ve spolupráci s VUT v Brně do tělesa hráze osazeny 4 vertikálně dělené odporové sondy pro sledování relativních změn elektrické impedance na základě metody EIS.

Monitorovací systém byl konstruován jako automatický s kontinuálním sběrem dat (Rupp a kol., 2016). Jejich přenos je zabezpečen prostřednictvím instalované GSM brány přímo do počítačů řešitelů projektů. Do budovy pod hrází byly instalovány dataloggery pro záznam hodnot z piezometrů a sond EIS. Místo průsaku na vzdušní straně hráze bylo praveno tak, aby bylo možné odebírat vzorky vody a měřit teplotu, elektrickou vodivost, pH a množství průsakové vody. Za tímto účelem byla instalována příslušná čidla a záznamník průtoku vody. Pozice průsaku, ústí jednotlivých vrtů a vedení kabelových drah byly geodeticky zaměřeny.

Systém pro monitorování hráze VD Hornice byl zbudován pro ověření účinnosti aplikace BioSealing na základě porovnání odpovídajících měřených veličin před zahájením rekonstrukce zemní hráze VD Hornice uvedenou metodou, v průběhu injektáže živného roztoku a po ukončení procesu (Rupp a kol., 2016). Monitorování je nutné realizovat v dostatečně dlouhém časovém období, aby bylo možné sledovat nejen průběh sanačního procesu, ale ověřovat jeho účinnost a případné změny po sanačním zásahu.

8 INJEKČNÍ PRÁCE METODY BIOSEALING

Pro realizaci sanace průsaku zemní hrází VD Hornice bylo z koruny hráze vyhloubeno 5 vrtů do hloubky 4,5 m za účelem dopravení živné směsi do prostoru zjištěných průsaků (Rupp a kol., 2016). Vrty byly vystrojeny perforovanou pažnicí.

Obr. 8.1 Hloubení injekčních vrtů pro aplikaci živné směsi

Obr. 8.2 Injekční vrty pro aplikaci živné směsi

8.1 PRVNÍ ETAPA

První etapa injekčních prací byla realizována v roce 2015 (Rupp a kol., 2015). Směs s obchodním názvem PNC Nutrolase byla do vrtů injektována po dobu 4 týdnů za současného monitorování změn průsaků. Injektážní práce byly zahájeny 4. 5. 2015, kdy byla zjištěna vhodná teplota zeminy pro životní aktivitu bakterií žijících v zemině hráze a ukončeny 11. 6. 2015.

V průběhu injekčních prací byla ověřena rychlá komunikace, v řádu jednotek minut, mezi místem injekce živné směsi a místem průsaku na vzdušné straně hráze (Rupp a kol., 2016). V místě průsaku byl zaznamenán nárůst elektrické vodivosti vody a snížení jejího pH. Výtok byl rezavě zabarven přítomností zbytku živné směsi. Rovněž bylo zaznamenáno okamžité zvýšení množství vytékající vody. Tento jev s postupným opakováním injekčních cyklů ztrácel na intenzitě tak, jak v tělese hráze docházelo k vytvoření šlemu a vzniku těsnění. Přibližně po 4 týdnech po ukončení injekčních prací zaznamenala monitorovací čidla pravděpodobnou reakci na sanační zásah. Došlo ke snížení velikosti pórových tlaků a nebyl zaznamenán žádný výtok v místě monitorovací stanice průsaku (Obr. 8.3). Hodnoty naměřených dat však byly značně ovlivněny skutečností, že po dokončení injektáže nastalo období nadprůměrně horkého léta s téměř nulovým množstvím srážek, kdy hladina vody v nádrži klesla pod úroveň dávkování živné směsi resp. pod úroveň pozorovaného výronu vody na vzdušné straně hráze. Tato skutečnost neumožnila jednoznačně prokázat účinek metody Biosealing, neboť menší či nulové průsaky bylo možné předpokládat i bez aplikace technologie Biosealing. V následujících měsících se průsak na vzdušném líci hráze opět projevil (Obr. 8.4), proto bylo rozhodnuto o druhé etapě dávkování živné směsi v roce 2016.

Obr. 8.3 Monitorovací stanice průsaku (15. 07. 2015)

Obr. 8.4 Měření průsaku (9. 11. 2015 – nahoře, 21. 3. 2016 – dole)

8.2 DRUHÁ ETAPA

Injekční práce druhé etapy dávkování živin stimulujících růst bakterií obsažených v zeminách byly zahájeny 9. 5. 2016, kdy bylo počasí stabilní a z hlediska teplot příznivé, a ukončeny 3. 6. 2016. Živná směs PNC Nutrolase byla do vrtů injektována po dobu 4 týdnů za současného navýšení úrovně hladiny vody v nádrži a monitorování změn průsaků.

Při uvedené druhé variantě bylo stanoveno, že hladina vody v nádrži bude udržována na konstantní úrovni, a to vyšší než normální hladina. Z uvedeného důvodu bylo provedeno přehrazení pomocného bezpečnostního přelivu (Obr. 8.5) a hladina vody v nádrži ve dvou fázích zvýšena nejprve o 0,17 m a následně o dalších 0,09 m.

Obr. 8.5 Přehrazení pomocného přelivu

Celkové navýšení hladiny vody v nádrži o 0,26 m probíhalo do 6. 6. 2016 a bylo doprovázeno zvýšením denního průsaku z hodnoty 50 l/den na hodnotu 200 l/den až 250 l/den. Do 28. 6. 2016 byla hladina v nádrži udržována na přibližně konstantní úrovni, 29. 6. 2016 bylo hrazení sníženo o 0,10 m. Pro sledování změn úrovně hladiny byl k pomocnému přelivu instalován snímač hydrostatického tlaku a snímač úrovně hladiny založený na metodě EIS (viz kap. 9.2).

Při aplikaci živné směsi byl do 5 vrtů denně mimo soboty a neděle vpravován celkový objem 205 l vodného roztoku Nutrolázy v dávkování 5 l Nutrolázy do 200 l vody (Obr. 8.6).

Obr. 8.6 Dávkování živné směsi pracovníky společnosti GEO*test*, a.s.

Kromě procesů vyvolaných aplikací metody BioSealing a kolísáním hladiny vody v nádrži měřené elektrické veličiny podléhají vlivu povětrnosti, kdy nejvýraznější podíl mají srážky a teplota. Při diskuzi průběhů měřených veličin je přijat předpoklad, že v průběhu měření nedochází v měřených profilech zeminy hráze k výrazným mechanickým ani chemickým změnám. Měřená elektrická vodivost vodného roztoku Nutrolázy se pohybovala v rozmezí 5 mS až 6 mS. Hodnota 5 mS byla měřena dne 9. 5. 2016 metodou EIS, hodnoty kolem 6 mS vyplývají z měření společností GEO*test*, a.s.

9 POUŽITÍ METODY EIS NA HRÁZI VD HORNICE

Monitorování metodou EIS bylo na VD Hornice realizováno tyčovými sondami, snímačem hladiny na principu EIS a měřením speciální mobilní vidlicovou sondou EIS.

9.1 SONDY METODY EIS

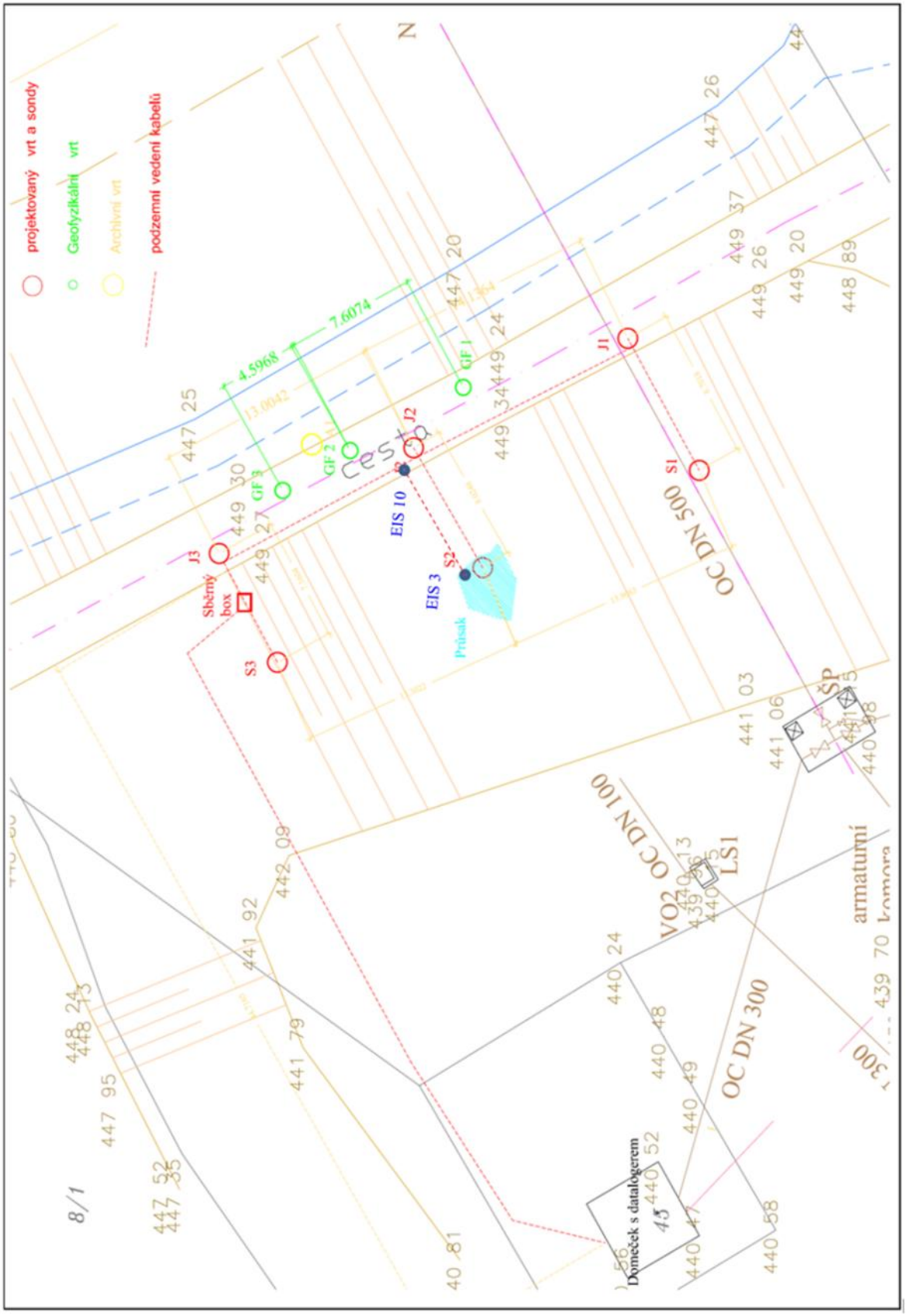
Na základě výsledků z první průzkumné etapy byly do tělesa hráze osazeny 2 odporové sondy metody EIS (4 paralelně umístěné tyče s měřicími snímači ve dvousvorkovém zapojení) pro sledování relativních změn elektrické impedance zeminy (Pařílková a kol., 2015). Osazení sond proběhlo ve dvou etapách, 13. 10. 2014 a 20. 10. 2014. Interval vodivých a nevodivých částí tyčí byl navržen na základě zjištěné geologické stavby hráze. Jedna sonda byla osazena z koruny hráze 0,15 m od horní hrany vzdušného líce hráze do hloubky 10,0 m, aby bylo možné monitorovat také podloží tělesa hráze, do předem připravených otvorů vyhloubených pomocí samopojízdné soupravy PAGANI TG 63/150 (Obr. 9.1). Na této sondě je celkem 22 snímačů, přičemž první se nachází v hloubce 1,0 m pod úrovní koruny hráze. Sonda celkové délky 3,0 m byla instalována do vzdušného svahu hráze v místě výronové plochy do manuálně vyhloubených otvorů (Pařílková a kol., 2015), výškově 3,03 m pod úrovní koruny hráze, přičemž první snímač je 0,03 m pod povrchem. Celkový počet snímačů na sondě délky 3,0 m je 16.

Obr. 9.1 Instalace 10 m dlouhé sondy metody EIS soupravou Pagani (Pařílková a kol., 2015)

Obě sondy byly navrženy jako dělené, vodivé části (elektrody) jsou provedeny trubicí z nerezavějící oceli o vnějším průměru 0,025 m, tloušťce stěny 0,002 m a délky 0,05 m, nevodivé části jsou z polyamidové trubice vnějšího průměru 0,025 m (Pařílková a kol., 2015). Sondy EIS jsou osazeny jako párové ve dvousvorkovém zapojení (není oddělen budicí a měřicí elektrický obvod). Vzdálenost mezi tyčemi (Obr. 9.2) respektovala terénní možnosti a podmínku nepřekročení vzdálenosti 2 m z důvodu přenosu generovaného budicího signálu (omezení vlivu geoelektromagnetického pole Země). Přenos signálu na povrch je zajištěn vodiči procházejícími trubicemi sond (Pařílková a kol., 2015) a dále potom ochrannými ohebnými trubkami (Obr. 9.3).

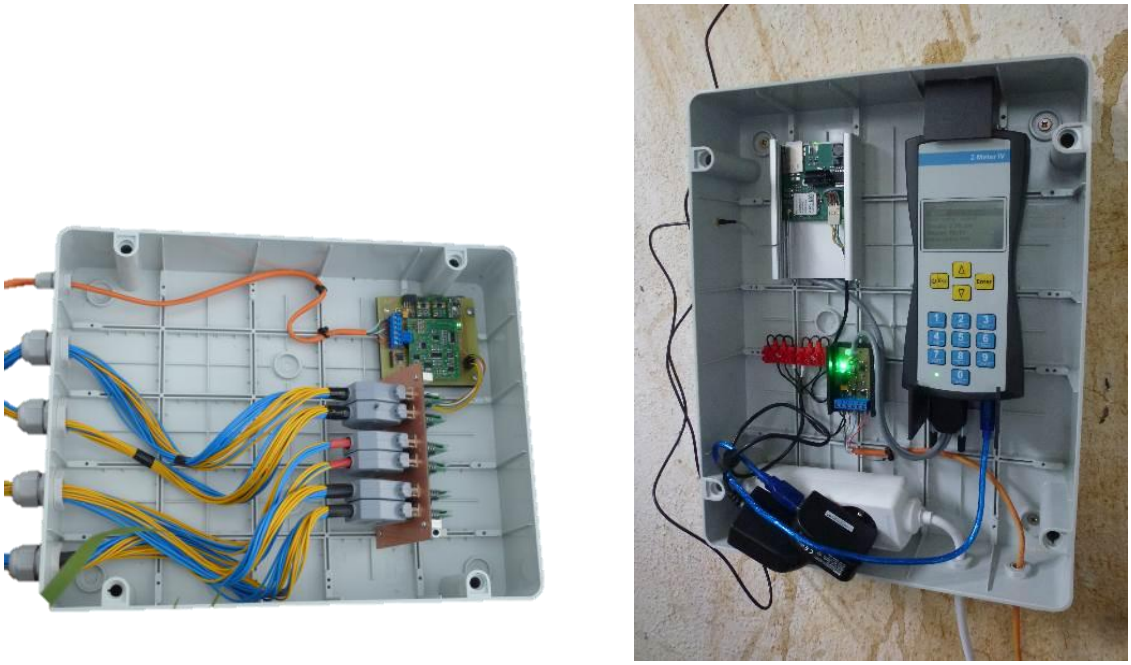
Obr. 9.2 Vzájemná pozice tyčí sond metody EIS (Pařílková a kol., 2015)

Obr. 9.3 Rozvod kabeláže a kontrolní manuální měření přístrojem Z-metr III



Obr. 9.4 Situace vrtů, sond a kabeláže na hrázi VD Hornice (u sond EIS je vyznačen geometrický střed mezi instalovanými tyčemi) (Pařílková a kol., 2015)

Do 8. 5. 2015 byl sběr dat realizován manuálně s frekvencí 1× měsíčně (Pařílková a kol., 2015). Dne 8. 5. 2015 bylo provedeno doinstalování komponent automatického autonomního sběru dat. Pasivní sondy vhodné pro manuální sběr dat byly doplněny externím přepínačem se zdrojovou jednotkou (Obr. 9.5). Po uvedené úpravě se sondy EIS staly aktivními. Měřicí signály soustředěné v boxu 1 (Obr. 9.5a) a dle zvoleného programu postupně přepínané externím přepínačem byly pomocí kabeláže vedené mělkým výkopem svedeny do „Domečku s datalogerem“ pod hrází a napojeny na přístroj Z-Metr IV, který umožňuje kontinuální záznam dat z instalovaných snímačů (Pařílková a kol., 2016). Situace sond, vrtů a kabeláže na hrázi VD Hornice je zřejmý z Obr. 9.4 (Pařílková a kol., 2015). Monitorování metodou EIS je realizováno 4 × denně, vždy v 1 hod, v 7 hod, ve 13 hod a v 19 hod. Získaná data jsou ukládána na SD kartu přímo do přístroje Z-metr IV a vždy po změření a uložení jsou také odesílána na e-mailovou adresu http://zmeter-hornice.dioda.cz/, kde je uveden výpis datových souborů dostupný odpovědným pracovníkům. Ukázka zpracování dat je uvedena v Příloze 1.



a) box 1 b) box 2

Obr. 9.5 Jednotka externího přepínače (a), dataloger EIS s modulem přenosu dat (b)

9.2 SLEDOVÁNÍ ZMĚN ÚROVNĚ HLADINY V NÁDRŽI

Změny úrovně hladiny vody v nádrži jsou sledovány dvěma měřicími aparaturami. Jedná se o snímač na principu EIS (pilotní realizace monitorování tohoto typu) a snímač hydrostatického tlaku.

9.2.1 Sledování změn úrovně hladiny v nádrži hydrostatickým snímačem úrovně hladiny

Hydrostatické snímače úrovně hladiny jsou v podstatě převodníky tlaku, které měří výšku hladiny prostřednictvím hydrostatického tlaku. Lze je rozdělit do dvou hlavních skupin – přímé měření hydrostatického tlaku a měření s probubláváním. Při měření úrovně hladiny na VD Hornice byl použit snímač s přímým měřením hydrostatického tlaku, kdy se poloha hladiny h vyhodnocuje z hydrostatického tlaku p sloupce vody v nádrži. Výsledek měření závisí rovněž na hustotě ρ' a tedy i na teplotě vody a na tíhovém zrychlení g (g = 9,81 m·s^{-2}), které je zpravidla považováno za konstantní. Tlak působí do všech stran, takže je ho možné měřit libovolně orientovaným tlakovým snímačem. Jednou z možností je ponorný snímač, kdy je senzor spuštěn na kabelu z prostoru nad hladinou. Podstatnou součástí snímače je membrána s tenzometrickým senzorem. Tenzometrický senzor je chráněn oddělovací membránou z korozivzdorného materiálu nebo plastu. Hydrostatický tlak, přímo úměrný výšce hladiny vody nad oddělovací membránou, je přenášen prostřednictvím náplně inertního oleje na měřicí polovodičový čip s tenzometrickým můstkem. Výstupní signál je elektronickými obvody teplotně kompenzován a upraven na standardní elektrický výstup 4 mA až 20 mA. Tenzometrický senzor ve snímači měří celkový tlak, který je součtem hydrostatického a atmosférického tlaku. Pro vyhodnocení polohy hladiny je nutno atmosférický tlak odečíst, a proto je přívodní kabel k sondě opatřen propojovací hadičkou (kapilárou), která funguje jako přívod referenčního tlaku. Z tohoto důvodu jsou snímače často označovány jako snímače relativního tlaku.

Výhodou hydrostatické metody měření hladiny je, že snímače neobsahují pohyblivé mechanické součásti (jako např. plováky či ponorná tělesa), metodu lze využít pro měření hladiny kapalin značně viskózních, znečištěných nebo agresivních i při teplotě do 400 °C. Další předností hydrostatických snímačů tlaku je nezávislost výstupu na tvorbě pěny a na elektrických vlastnostech měřené látky (elektrická vodivost, permitivita).

V uvedené aplikaci je nevýhodou závislost na její hustotě (teplotě) a nebezpečí zamrznutí přívodů ke snímači tlakové diference v nádržích mimo uzavřené objekty. Je-li požadována přesnost měření hladiny lepší než 0,05 m, je vhodné zvolit jiný typ snímače (Šálek, 2001). Problémem snímačů relativního tlaku kromě závislosti na teplotě může být zatěsnění senzoru a přívodu atmosférického tlaku či případná kondenzace vodních par

v přívodních kapilárách. Např. při rozsahu 25 MPa tvoří „zatěsněných“ cca 100 kPa chybu 0,4%, ale u rozsahu 1 MPa je to už 10 % [4].

Pro měření úrovně hladiny v nádrži VD Hornice byl použit snímač relativního hydrostatického tlaku ESMWLPS Water level sensor, jehož parametry jsou:

Brand Name: ESMModel

Číslo: ESMWLPS, název: ESMWLPS Water level sensor,

výstupní signál:4 mA – 20 mA,

měřicí rozsah: 0 m – 3 m,

délka kabelu: 3 m,

měřené médium: voda,

přesnost: 0.1% fs.

Technická data

Měřicí rozsah: 0 m ~ 3 m,

měřená média: voda, olej,

typ tlaku: relativní tlak,

výstupní signál: 4 mA ~ 20 mA/0 V – 10 V/0 V – 5 V/1 V – 5 V,

dlouhodobá stabilita: ±0.1% F.S,

teplotní drift: ±0.01%FS/Celsius,

napájení: 24VDC(standard),

přesnost: 0,1%,

přetížení: 200%FS,

okolní teplota: -40 °C ~ 85 °C,

stupeň krytí: IP68,

materiál: nerezavějící ocel 304,

frekvenční odezva: ≤500 Hz,

teplota měřeného média: -40 °C ~ 85 °C.

Dle pokynů výrobce byl pro výpočet úrovně hladiny vody v nádrži použit přepočetní vztah

$$h = \left(\frac{P}{16384} - 1\right) + a,$$

kde *h* je hloubka ponoření snímače [m], *P* je číselná hodnota ze souboru, *a* je konstanta pro přepočet na skutečnou hloubku.

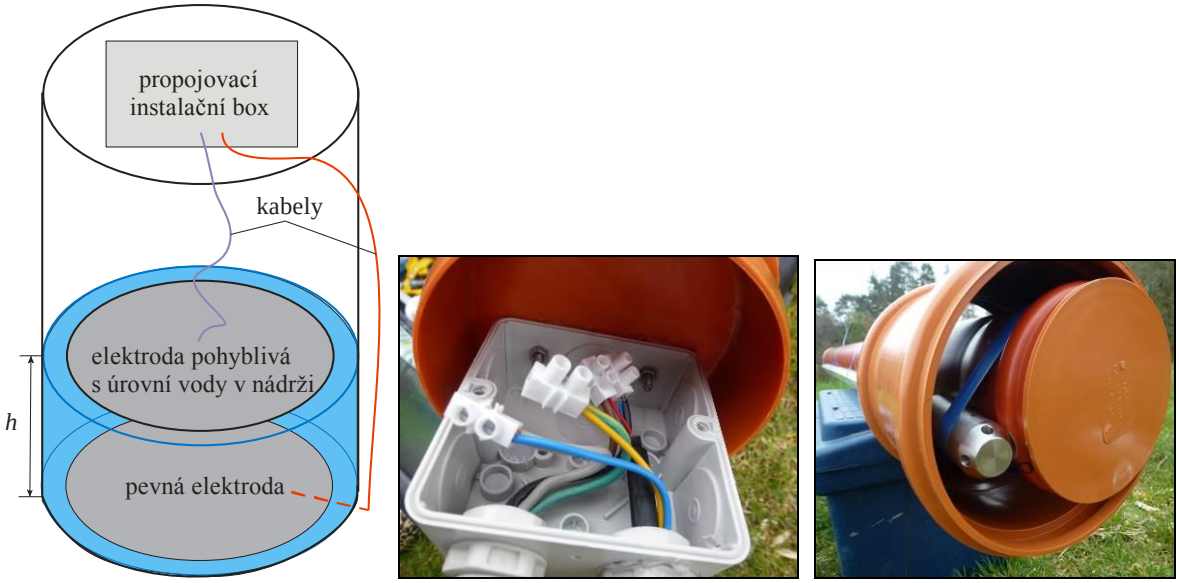
9.2.2 Sledování změn úrovně hladiny v nádrži pomocí EIS

Metoda EIS byla rovněž využita pro sledování změn úrovně hladiny vody v nádrži. Protože se jedná o nepřímou měřicí metodu, bylo nutné nejprve provést kalibraci elektrického odporu *R* vzhledem k výšce vodního sloupce *h*.

Elektrický odpor *R* resp. elektrická vodivost $G = 1/R$ závisí na koncentraci iontů, jejich náboji, pohyblivosti, na teplotě měřené vody (při zvýšení teploty o 1 °C se zvětší hodnota *G* cca o 2 %). Numerická hodnota elektrické vodivosti *G* se mění s délkou elektrického vodiče reprezentovaného výškou vodního sloupce *h*. Kalibrační měření probíhala ve dvou krocích, kdy byla pro laboratorní experiment nejprve použita pitná voda odebraná z vodovodního řadu, a ve druhém kroku byl zopakován s vodou přivezenou z nádrže VD Hornice. Čím větší je hodnota rezistance *R*, resp. menší hodnota *G*, tím delší je elektrický vodič reprezentovaný vodním sloupcem. Uvedené však platí pouze za předpokladu konstantních podmínek měření (poloha a čistota zařízení) a vlastností vody (chemismus, teplota), což může být zejména při polních měřeních problém. Reaktance *X* postihuje případné změny na elektrodách či přítomnost částic cizích látek ve vodě apod. Konstrukce snímače hladiny založeného na metodě EIS je zřejmá z Obr. 9.6. Kruhové elektrody průměru 0,075 m vyrobené z nerezového plechu tloušťky 0,001 m byly osazeny do PVC trubky průměru 0,110 m a celkové délky 1,6 m. Pevná elektroda byla fixně umístěna ve dně měřicí trubky, mobilní elektroda byla instalována na polystyrenovou desku tloušťky 0,030 m. Z důvodu omezení deformace vnitřní stěny trubky např. růstem řas, slizu či vlivem teploty a z důvodu sledování pouze kontinuálních změn hladiny (např. bez vlivu vlnění hladiny působícím větrem), byla trubka umístěna do převlečné PVC-U trubky průměru 0,160 m. Do této trubky byl umístěn i tlakový snímač. V horní části je trubka kryta pevně nasazenou přesuvkou, ke které je z vnitřní strany vruty připevněn box s kabely. Celá konstrukce byla připevněna v místě instalované vodočetné latě k betonové svislé stěně pomocného přelivu. Elektrický signál od obou instalovaných snímačů je veden stíněným kabelem délky 50 m po obvodu nádrže do boxu 1 (Obr. 9.5a) se zapojenými EIS snímači monitorujícími zeminu hráze.

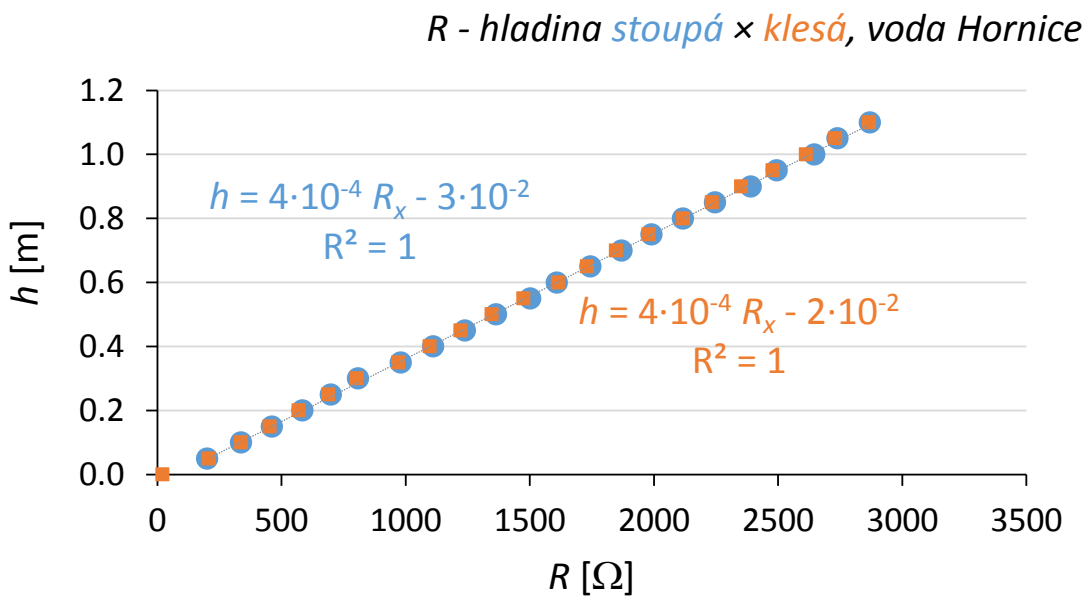
Měření metodou EIS bylo realizováno při frekvenci f = 2 000 Hz, s dobou přepínání mezi měřeními t = 0,100 s, počet opakování na snímači byl n = 5. Využito bylo dvousvorkové zapojení elektrod. Parametry monitorování byly zvoleny v návaznosti na automatický autonomní provoz monitorovací aparatury s přístrojem Z-metr IV.

Ověření metody EIS při měření úrovně hladiny vody v nádrži VD Hornice je pilotním projektem.



Obr. 9.6 Princip měření a zapojení snímače hladiny založeného na metodě EIS, vpravo hydrostatický snímač úrovně hladiny ESMWLPS Water level sensor

Zpracování změřených dat bylo provedeno pomocí programu MS Excel. V laboratorních referenčních podmínkách byla při standardní teplotě 25°C v režimech zvýšení a snížení hladiny vody odebrané z nádrže VD Hornice v měřicí trubce stanovena závislost $h = f(R)$. Referenční podmínky v laboratoři, při nichž bylo měření provedeno, byly následující: teplota vzduchu 23,1 °C ±2,3 °C (měřeno na počátku a na konci experimentu) a vlhkost vzduchu 48,7 % r. v. ±4,6 % r. v. (měřeno před začátkem kalibrace). Přivezenou vodu z nádrže VD Hornice bylo nutno na uvedenou teplotu temperovat, neboť teplota přivezeného vzorku vody o objemu 0,04 m^3 byla 5,7 °C ±1,5 °C. Tím byla provedena kalibrace (Obr. 9.7).



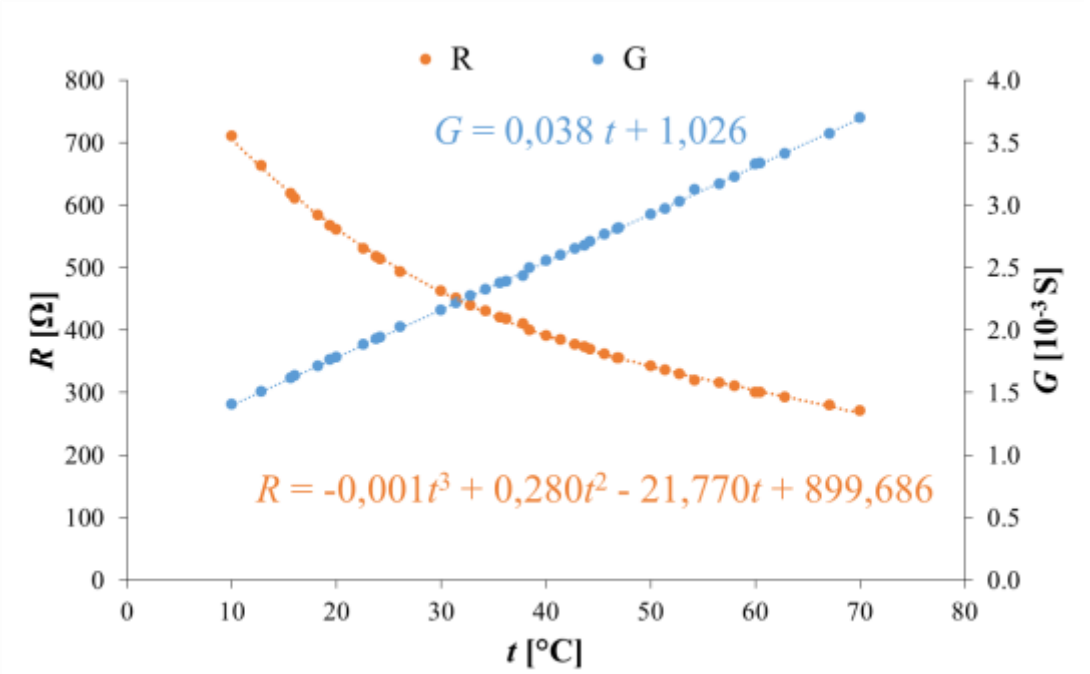
Obr. 9.7 Kalibrace EIS sondy pro měření hladiny v laboratorních podmínkách

Bylo zjištěno, že reaktance se na celkové hodnotě elektrické impedance **Z** podílí maximálně do 18 %. Proto dále při kalibraci byla uvažována pouze rezistance *R*. Kalibrační rovnice při referenční teplotě vody 17,5 °C ±0,5 °C je uvedena na Obr. 9.7.

Dále byla stanovena závislost rezistance na teplotě $R = f(t)$. Měření byla provedena rovněž v laboratoři při stejných referenčních podmínkách. Vzorky vody byly temperovány v Mini Inkubátoru Labnet [1], který vzhledem k topným tělesům zabudovaným do všech stěn inkubátoru umožňuje rovnoměrné (rovnoměrnost 0,65 °C při 37 °C) a stabilní (stabilita ±0,6 °C při 37 °C) rozložení teploty. Analogové nastavení teploty s přesností cca 3 °C až 5 °C je možné v teplotním rozsahu od +5 °C do +60 °C. Teplota měřené vody byla sledována lihovým teploměrem s výrobcem předepsaným plným ponorem (teploměr je ponořen do měřeného prostředí až po konec teploměrové kapaliny v kapiláře) a rozlišitelností 1 °C umístěným do vzorku vody skrz strop inkubátoru. Ve dvojité zadní stěně inkubátoru je instalační otvor, kterým byly vedeny vodiče od snímače EIS k měřicímu přístroji Z-metr IV. Na Obr. 9.8 je schematicky uveden princip kalibračního měření. Požadovaná teplota byla nastavována ručně otočným regulátorem „Temperature Control“ s plynulou regulací dle vyznačené stupnice od 0 dílků do 10 dílků a s citlivostí 0,5 dílku. Doba ohřevu byla signalizována diodou s označením „Heating“. Je třeba konstatovat, že se zvětšováním teploty se zvětšoval obsah rozpuštěného vzduchu ve vodě a ze vzorku vody se začaly uvolňovat vzduchové bubliny (Obr. 9.9). Vlastnosti vody jako elektrického vodiče tak byly změněny. Je zřejmé, že se zvětšující se teplotou se zmenšuje elektrický odpor vody, resp. zvětšuje elektrická vodivost. Zjištěná teplotní závislost $R = f(t)$ je nelineární (Obr. 9.10) avšak pro teplotní intervaly stanovené dle teploty vody v nádrži VD Hornice byla po částech linearizovaná. Lineární průběh elektrické vodivosti odpovídá teoretickému předpokladu. Podíl měřených hodnot reaktance *X* (vliv uvolněných bublin vzduchu) byl do 20 % absolutní hodnoty elektrické impedance **Z**, a proto i v tomto případě bylo dále pracováno pouze s hodnotou rezistance vody.

Obr. 9.8 Mini Inkubátor s instalovaným vzorkem

Obr. 9.9 Vzorek vody před započetím ohřevu (vlevo) a po ohřevu (vpravo)

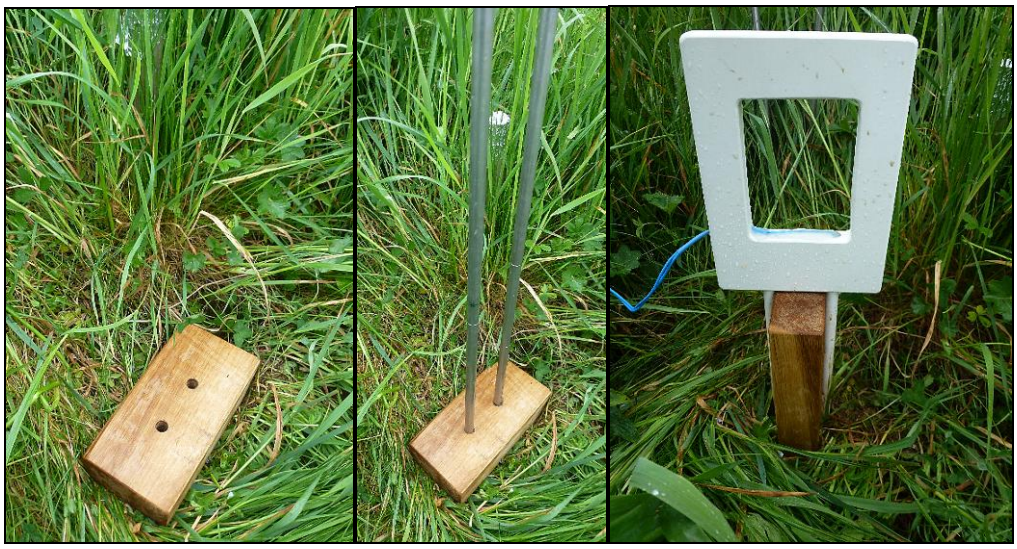


Obr. 9.10 Teplotní závislost rezistance R a konduktance G vody z nádrže VD Hornice

9.3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI V OBLASTI VÝRONOVÉ PLOCHY

Měření elektrické impedance zeminy v oblasti výronové plochy bylo provedeno mobilní vidlicovou sondou a přístrojem Z-metr IV. Vidlicová sonda (Obr. 9.11) je konstruována jako párová s jedním snímačem tvořeným dvěma elektrodami. Elektrody jsou realizovány tyčí z nerezavějící oceli o průměru 0,012 m a délce 0,040 m. Z důvodu snazší instalace do zeminy jsou elektrody zakončeny hrotem. Osová rozteč mezi hroty elektrod tvořících snímač je 0,060 m. Snímač je možno postupně instalovat do maximální hloubky 0,340 m. Povrch ocelových tyčí je v délce 0,300 m opatřen izolačním materiálem tak, aby lícoval průměr obnažené měřicí části elektrody a části elektrody s izolačním materiálem. Zhlaví snímače je zabudované do robustní rukojeti z PVC o rozměrech 0,205 m × 0,147 m × 0,020 m s otvorem o rozměrech 0,114 m × 0,085 m × 0,020 m pro umožnění manipulace se sondou. Ve spodní části rukojeti sondy jsou zataveny kabely propojující elektrody s přístrojem Z-metr IV. Délka kabelů je 1,5 m a jejich volný konec je opatřen 25 pinovým konektorem CANON.

Součástí instalační sestavy je kladivo a dvě nerezové tyče průměru 0,012 m a délky 1 m, jejichž pomocí lze v případě potřeby připravit otvory pro umístění snímače EIS. Dalším přípravkem usnadňujícím manipulaci v polních podmínkách je dřevěný hranol, v jehož ose jsou vyvrtány dva otvory ve vzdálenosti rozteče elektrod a jehož rozměry 0,020 m × 0,010 m × 0,045 m umožňují snadnou kontrolu hloubky, v níž se při měření nachází snímač.



Obr. 9.11 Mobilní vidlicová sonda a její instalace při měření

10 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

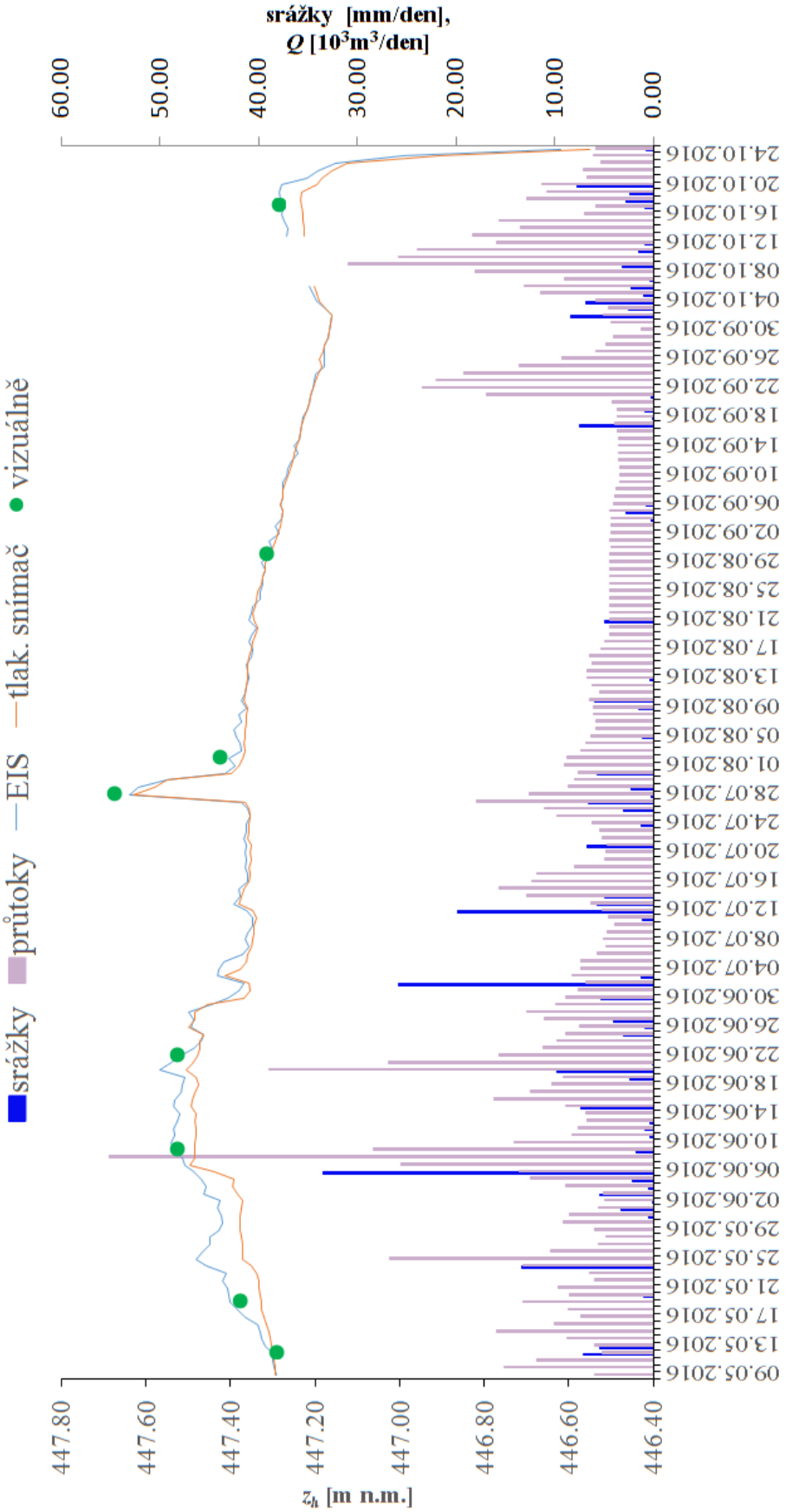
Posuzován je průběh úrovně hladiny vody v nádrži měřený snímačem EIS a snímačem hydrostatického tlaku, změny probíhající v zemině hráze v důsledku aplikace technologie BioSealing a výronová plocha s výronem vody na vzdušním líci zemní hráze VD Hornice.

10.1 ZMĚNY ÚROVNĚ HLADINY VODY V NÁDRŽI

Snímače úrovně hladiny vody byly na nádrži VD Hornice osazeny 11. 4. 2016 (Obr. 10.1), dokončení jejich plné integrace do stávajícího monitorovacího systému a zahájení automatického sběru a přenosu dat bylo 9. 5. 2016.

Obr. 10.1 Instalace snímačů hladiny na nádrži VD Hornice

Dále jsou průměrné denní hodnoty úrovně hladiny vody v nádrži zpracovány v korelaci s průměrnými denními srážkami ze srážkoměrné stanice Moravské Budějovice a průtoky z limnigrafické stanice Jemnice (Obr. 10.2).



Obr. 10.2 Průběh hladiny vody v nádrži v korelaci se srážkami a průtoky (průměrně denní hodnoty)

Z uvedených průběhů je zřejmá dobrá shoda výsledků získaných z vizuálního měření s výsledky snímače EIS. Údaje získané hydrostatickým snímačem úrovně hladiny vykazují v období 13. 5. 2016 až 22. 6. 2016 kvantitativně menší hodnoty, avšak kvalitativně jsou průběhy v dobré nejen vzájemné shodě, ale i se zaznamenanými srážkami a průtoky. Stejnou skutečnost lze pozorovat také na konci měřeného období, od 13. 10. 2016 do 20. 10. 2016. Od 23. 06. 2016 do 12. 10. 2016 lze konstatovat jak kvalitativní, tak i kvantitativní shodu průběhu úrovně hladiny vody stanovenou oběma snímači. Grafické znázornění průběhu hladin je zde uvedeno pouze do 24. 10. 2016 z důvodu vypuštění nádrže, kdy úroveň hladiny vody v nádrži klesla pod snímači měřitelný rozsah a také pod úroveň pozorovaného průsaku.

V případě obou měřicích metod je třeba mít na zřeteli, že se jedná o nepřímé měřicí metody. Kromě nutnosti kalibrace na veličinu sledovanou je proto třeba pečlivě uvážit, čím a jak je kvantitativní hodnota měřené veličiny ovlivněna, a to nejen v laboratorních podmínkách, ale především při polních měřeních. Vzhledem k poměrně širokému spektru možných vlivů v polních podmínkách (postup usazení trubky se snímači, teplota, kondenzace vodních par v kapiláře atmosférického tlaku u tlakového snímače, nečistoty ulpívající na snímačích, chemická změna kvality vody, atd.) je obtížné komentovat důvody kvantitativních odchylek zejména v prvním období, které se pohybovaly od -0,002 m do 0,145 m tj. odchylka 0,08 % až 4,83 % z měřicího rozsahu tlakového čidla 3 m. Poněvadž došlo ke shodě hodnot vizuálního měření s hodnotami stanovenými snímačem EIS a poněvadž konstrukčně jsou snímač EIS a hydrostatický snímač úrovně hladiny umístěny v jedné ochranné trubce, je pravděpodobné, že u hydrostatického snímače nebylo správně zajištěno propojení s atmosférickým tlakem (dva závity kabelu s kapilárou v trubici, možnost kondenzace par). V delším časovém horizontu se „cesta“ uvolnila, avšak dosahované odchylky se dále pohybovaly v rozmezí -0,090 m až 0,070 m, což je 2,3 % až 3 % z měřicího rozsahu tlakového čidla 3 m. Je tedy možné konstatovat stabilizaci rozptylu odchylek měřených hodnot, avšak vzhledem ke skutečnosti, že výrobce deklaruje přesnost 0,1 %, je výsledek diskutabilní.

Dosažené výsledky dokazují možnost využití metody EIS a realizované aparatury s přístrojem Z-metr IV i pro uvedený typ měření. Při prováděných korelacích např. na povětrnostní vlivy je třeba vždy zohlednit sledovanou lokalitu a v ní rovněž činnost člověka. Např. pomocný bezpečnostní přeliv na VD Hornice, který byl pro zvětšení úrovně hladiny vody v nádrži přehrazen, byl z důvodu záchytu ryb opatřen ještě sítem. Uvedené opatření však mělo vliv nejen na rybí obsádku, ale rovněž síto zachytávalo plovoucí nečistoty (Obr. 10.3). Tedy mnohé měřené změny úrovně hladiny vody v nádrži nesouvisí jen se srážkami. Doložit je to možné epizodou z 28. 0 7. 2016: Přívalová srážka zaznamenaná v obci Hornice byla 0,044 m. Měřené zvětšení úrovně hladiny vody v nádrži snímačem EIS bylo 0,288 m, tlakovým snímačem 0,289 m a 0,290 m ve vrtu č. 3 v tělese

hráze. Dne 29. 7. 2016 bylo oběma snímači zaznamenáno zmenšení úrovně hladiny o 0,079 m (snímač EIS) a 0,076 m (tlakový snímač) a 0,140 m (vrt č. 3), pravděpodobně v důsledku postupného uvolňování nečistot ze síta a ve večerních hodinách 31. 7. 2016 bylo znamenáno další zmenšení úrovně hladiny o 0,195 m (snímač EIS) a 0,183 m (tlakový snímač) a 0,160 m (vrt č. 3) pravděpodobně v důsledku lidské činnosti (jednorázové odstranění nečistot ze síta člověkem).

Obr. 10.3 Hrazení pomocného přelivu (vpravo), zanášení instalovaného síta (vpravo)

10.2 MONITOROVÁNÍ DŮSLEDKŮ APLIKACE METODY BIOSEALING

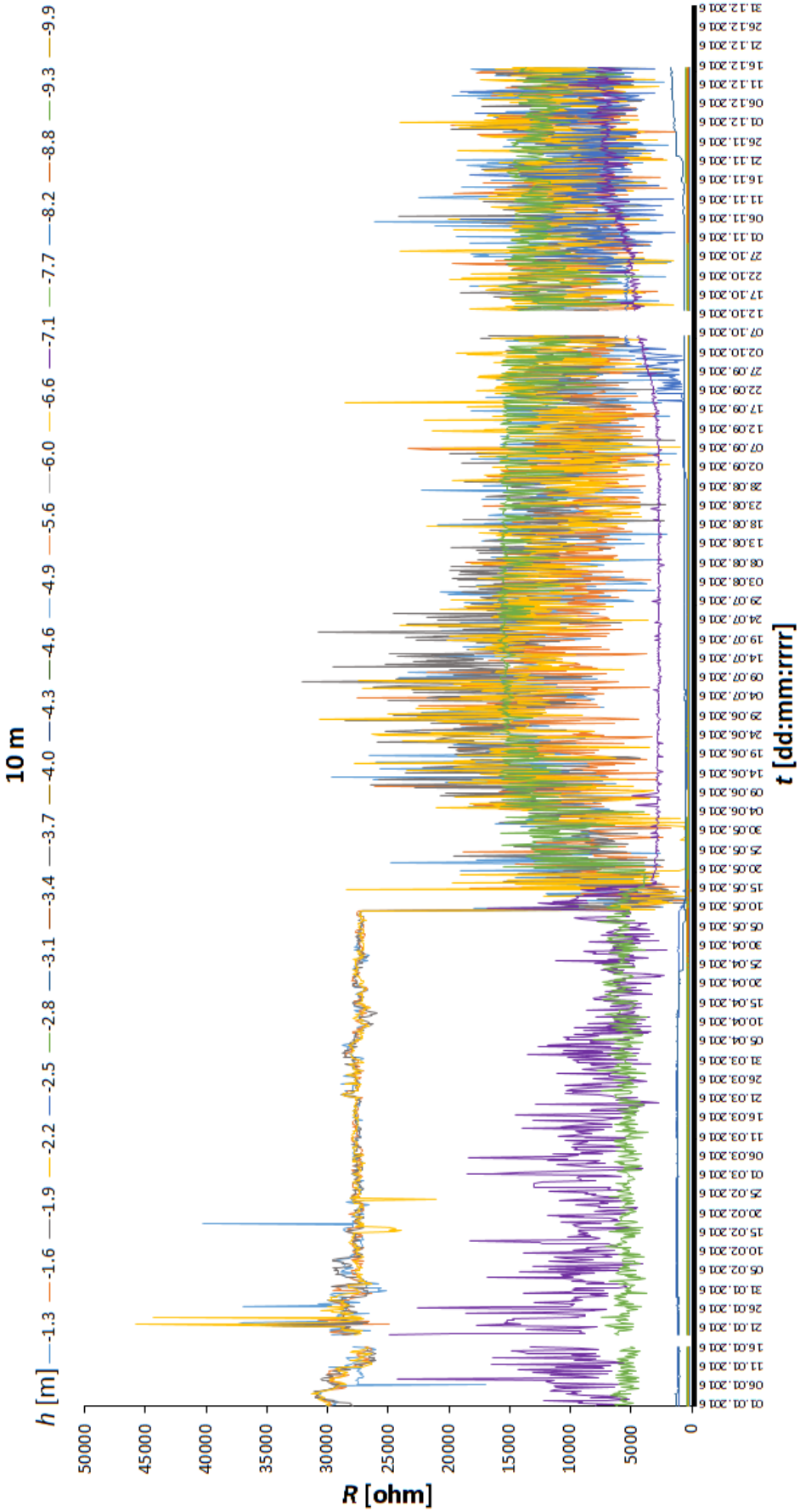
Výsledky monitorování změn probíhajících v zemině zemní hráze v důsledku aplikace metody BioSealing jsou zpracovány jako časové změny rezistance zeminy hráze (Obr. 10.4), časově diskrétní průběhy elektrické vodivosti a reaktance zeminy hráze hodnocené v polovině měsíce ve 13 hod. (Obr. 10.7) a jako změny průměrné admitance (Obr. 10.9) stanovené v jednotlivých měsících daného roku aritmetickým průměrem hodnot měřených každou sondou (Pařílková a kol., 2016).

10.2.1 Časové změny rezistance zeminy

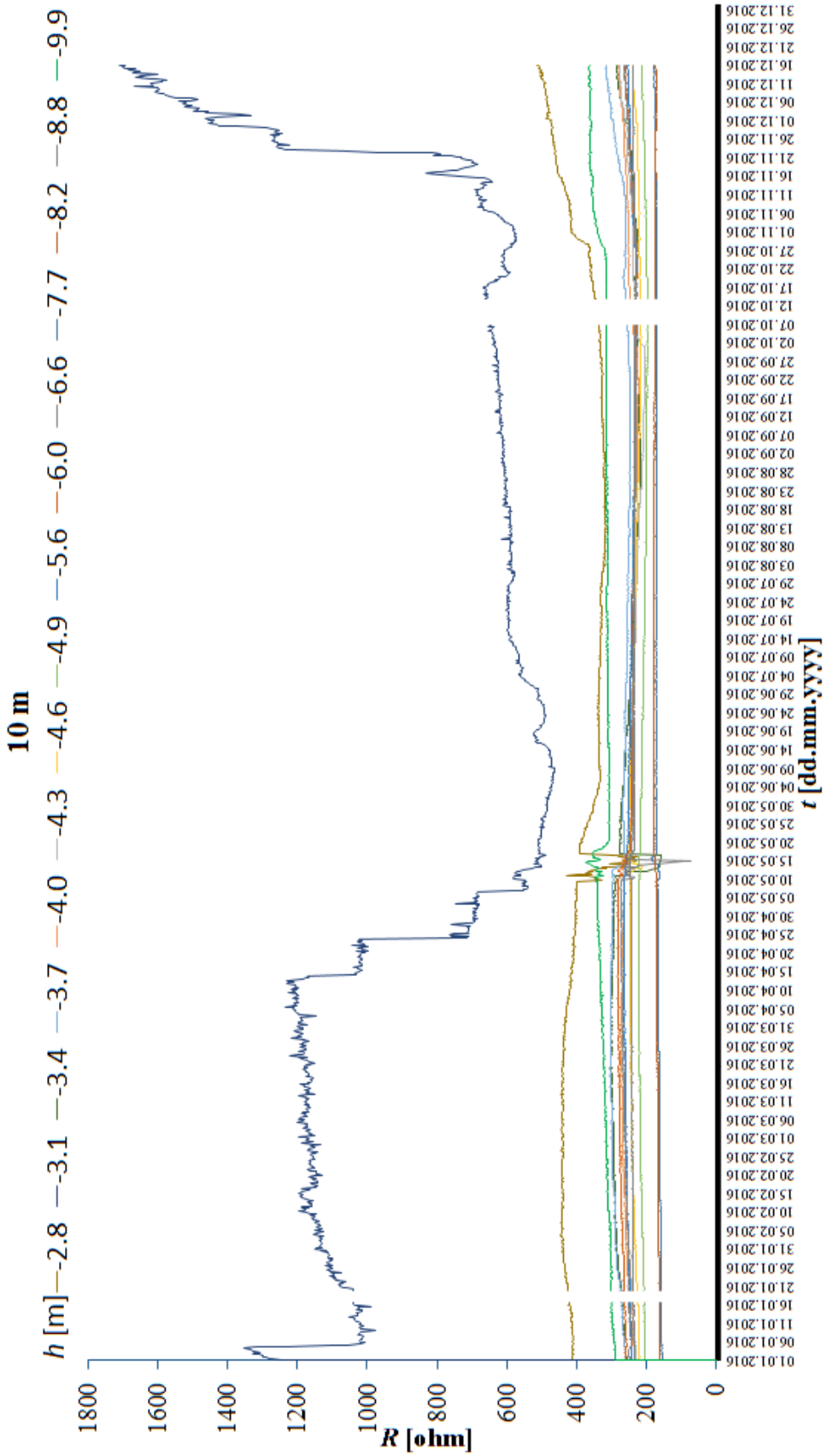
Časový průběh rezistance *R* (Obr. 10.4) měřený v roce 2016 oběma sondami v jednotlivých hloubkách dokumentuje děje probíhající v zemině hráze v průběhu monitorovacího období. V období od 9. 5. 2016 do 3. 6. 2016 probíhala aplikace vodného roztoku Nutrolázy. Ve všech hloubkách bylo v uvedené periodě monitorování zaznamenáno výrazné zmenšení hodnot *R*, což znamená, že v obou monitorovaných profilech zeminy hráze došlo ke zvětšení obsahu vody. Metodou EIS však nemá být dokumentován pouze proces aplikace metody BioSealing, ale především její účinnost tzn., zda dochází k procesu sanace hráze. Proto je nutné realizovat dlouhodobé monitorování.

Pokud bude v některé z monitorovaných hloubek dlouhodobě zaznamenáno zvětšení *R* nad počáteční hodnotu, bude možné v této hloubce, s ohledem na ostatní sledované veličiny, konstatovat úspěšnou sanaci technologií metody BioSealing ve specifických podmínkách zemní hráze VD Hornice.

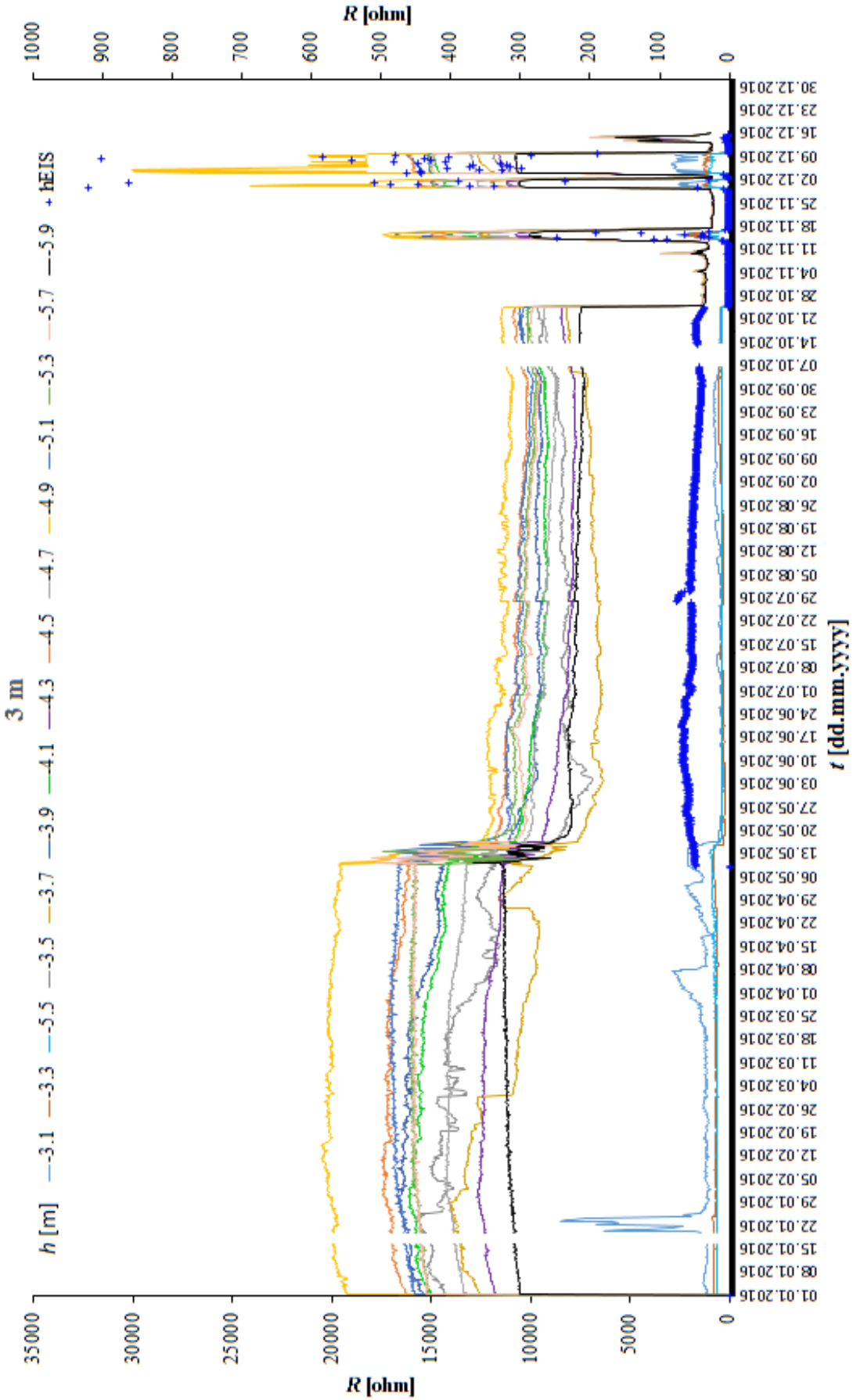
Dávkování vodného roztoku Nutrolázy bylo uzpůsobeno podmínkám lokality, v nádrži VD Hornice byla přehrazením pomocného přelivu zvýšena úroveň hladiny vody, byly doplněny některé snímače (měření úrovně hladiny vody v nádrži dokladuje modrá křivka tvořená křížky u sondy 3 m, měření teploty vzduchu a úrovně hladiny ve vrtech apod.). Cílem uvedených opatření bylo minimalizovat vliv povětrnostních podmínek na proces sanace zemní hráze metodou BioSealing, u níž se současně předpokládá, že její jednotlivé prvky neovlivňují měřené složky elektrické impedance. Přestože bylo konstatováno, že výron vody je děj prostorový, z důvodu koordinace jednotlivých technologických kroků se nepodařilo rozšířit počet sond metody EIS. Měření proto probíhala na stávajících sondách a vyhodnocen je profil ve vzdálenosti 0,5 m od pozorovaného výronu vody resp. od instalovaného měření průsaku.



Obr. 10.4a Časové změny rezistance *R* na sondě délky 10 m ve všech měřených úrovních



Obr. 10.4b Časové změny rezistance *R* na sondě délky 10 m ve vybraných úrovních



Obr. 10.4c Časové změny rezistance *R* a hladiny vody v nádrži na sondě délky 3 m

U sondy celkové délky 10 m, která dosahuje až do podloží hráze, lze v hloubkách -1.3 m až -2.2 m pozorovat fluktuaci hodnot rezistance *R*, která s velkou pravděpodobností souvisí se strukturou zeminy (obsah štěrku apod.). Reakce na zahájení procesu sanace však je zřejmá i v těchto úrovních. Po jejich vyjmutí z grafu je v měsíci červnu a červenci zřejmé zvětšení hodnot *R* v hloubkách -2.5 m, -3.1 m a -9.3 m. Rovněž je zřejmé, že v hloubkách -4.9 m, -6.0 m, -7.7 m, -8.2 m a -8.8 m se kvantitativně hodnoty *R* před a po aplikaci vodného roztoku Nutrolázy nezměnily. Na základě uvedeného lze proto ve větších hloubkách dominantně předpokládat vliv proudění podzemní vody, v hloubce -4,9 m se může jednat o průsak vody z nádrže. Přestože měření v roce 2016 probíhá za kvalitativně jiných podmínek než v roce 2015, uvedené závěry si neodporují.

U sondy s celkovou délkou 3 m, která byla instalována v místě pozorovaného výronu vody a nedosahuje k základové spáře hráze, dochází k výraznějším časovým změnám průběhů rezistance *R* v jednotlivých úrovních (Obr. 10.4c). Výrazné změny v průběhu *R* jsou patrné v hloubce -3,1 m (povrch vzdušného líce hráze). Např. extrém měřený v lednu 2016 koreluje s nejnižší měřenou teplotou, která v uvedenou dobu byla v lokalitě -25 °C. Zřejmé je průběžné zmenšování hodnot *R* v hloubkách -3,5 m a -3,7 m a méně výrazné v hloubkách -3,9 m a 4,1 m. Při aplikaci vodného roztoku Nutrolázy ve dnech 9. 5. 2016 až 3. 6. 2016 lze pozorovat reakci (zmenšení hodnot *R*) ve všech monitorovaných hloubkách. Po ukončení uvedeného procesu však lze výrazné zvětšení hodnot *R* pozorovat v měsících červnu a červenci 2016 pouze v hloubce -3,5 m (tj. v hloubce 0,4 m pod povrchem).

Z Obr. 10.4c je zřejmá souvislost průběhů rezistance *R* s hodnotami naměřenými snímačem EIS úrovně hladiny. Od 9. 5. 2016, kdy byl instalován snímač úrovně hladiny, dochází ke zvyšování hodnot rezistance měřené tímto snímačem, což značí zvýšení úrovně hladiny vody v nádrži. Současně dochází ve všech měřených úrovních k poklesu rezistance zeminy. Tento jev odpovídá předpokladu, že čím vyšší je úroveň hladin vody v nádrži, tím větší je hydrostatický tlak a také uvažovaný průsak zeminou, tedy tím více je zemina nasycena vodou. Z uvedeného vyplývá, že tendence průběhů hodnot naměřených snímačem úrovně hladiny vody a průběhů hodnot v jednotlivých úrovních zeminy by měly být opačné. Jelikož se ale jedná o jev prostorový a měření je prováděno pouze v jednom příčném profilu hráze, nelze tuto skutečnost aplikovat globálně.

Přibližně od 20. 10. 2016 hodnoty měřené sondou délky 3 m prudce klesají a dále vykazují výrazná minima a maxima, a to ve všech měřených úrovních. Extrémy vykazují i průběhy hodnot měřených snímačem EIS pro stanovení hloubky vody. V uvedené době došlo k manipulaci s výpustným objektem a následnému vypouštění vody z nádrže. Úroveň hladiny vody v nádrži klesla pod instalovanými snímači měřitelný rozsah (v trubicích snímačů úrovně hladiny není voda) (Obr. 10. 5) a zaznamenané hodnoty nejsou adekvátní a nelze s nimi dále pracovat. Zajímavé je, že extrémy měřené snímačem

úrovně hladiny a sondou EIS vykazují obdobné průběhy, a to ve všech měřených úrovních zeminy. Tento jev je velmi obtížně vysvětlitelný. Vzhledem k tomu, že poklesla úroveň hladiny vody, dalo by se předpokládat spíše zvýšení hodnot rezistance *R* měřené zeminy, hodnoty *R* se však, při zanedbání extrémně vysokých hodnot, výrazně snížily a blíží se měřeným hodnotám rezistance *R* vody v nádrži. Při dalším sledování, které jsem pro účely diplomové práce ukončila 31. 12. 2016, byla pozorována souvislost se změnou teploty. Pokud byla teplota prostředí pod 0°C snímače měřící rezistanci zeminy pracovaly ve všech hloubkách v „obvyklém“ režimu, kdy vlivem mrazu byla nejvyšší hodnota rezistance zaznamenána v hloubce -3,1 m a směrem k hloubce -5,9 m se hodnoty *R* postupně zmenšovaly. Nastala-li však obleva, tedy teplota prostředí byla nad hodnotou 0°C, došlo opět k již výše uvedenému jevu, kdy snímače ve všech měřených hloubkách vykazují velmi nízkou hodnotu. Manipulace na hrázi v zimních měsících je velmi problematická. Proto by s objasněním pozorovaného jevu mohlo pomoci monitorování v roce 2017 včetně revize měřicí trasy.

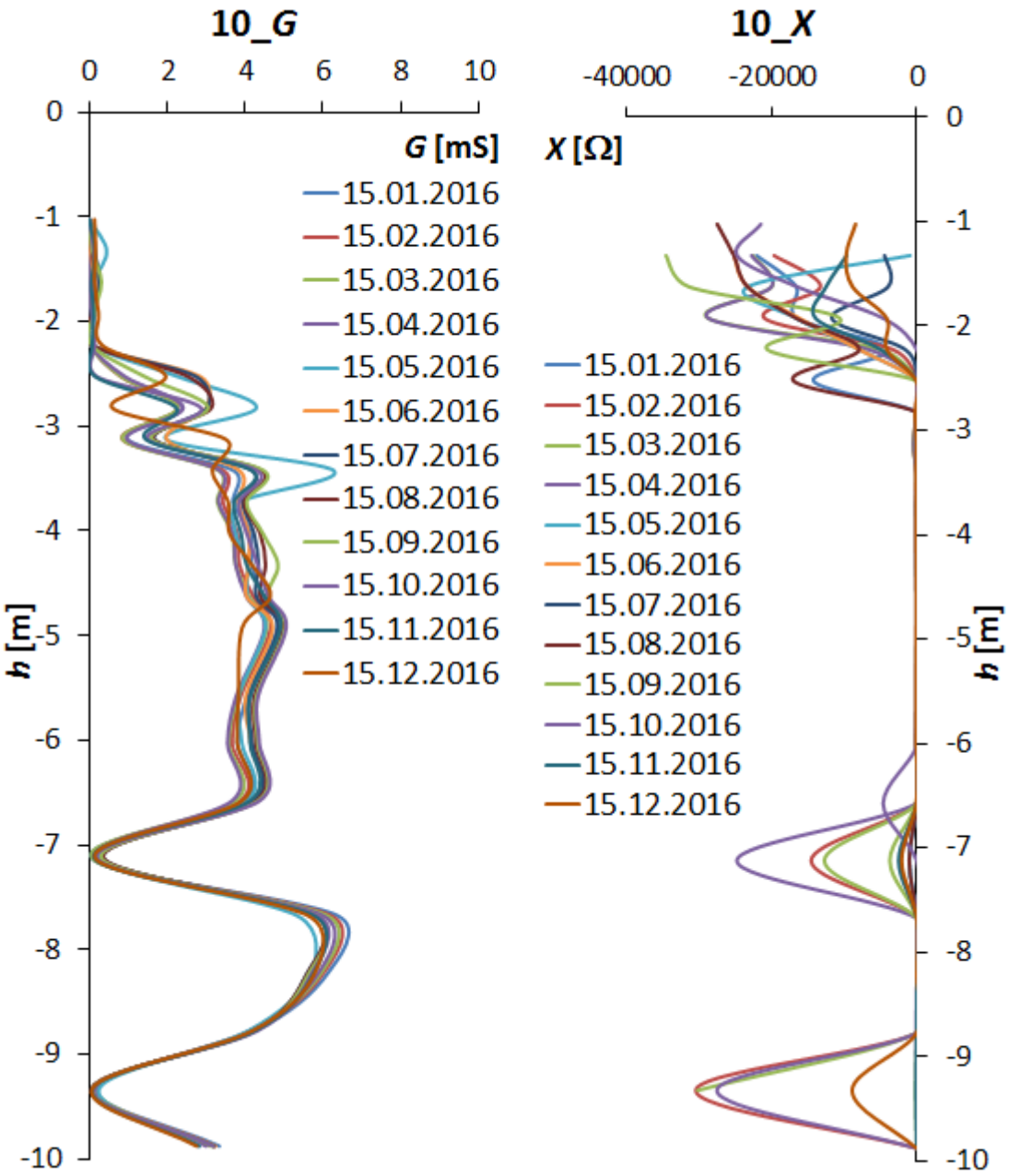
Obr. 10.5 Úroveň hladiny v nádrži VD Hornice (5. 12. 2016)

10.2.2 Průběhy hodnot elektrické vodivosti a reaktance zeminy

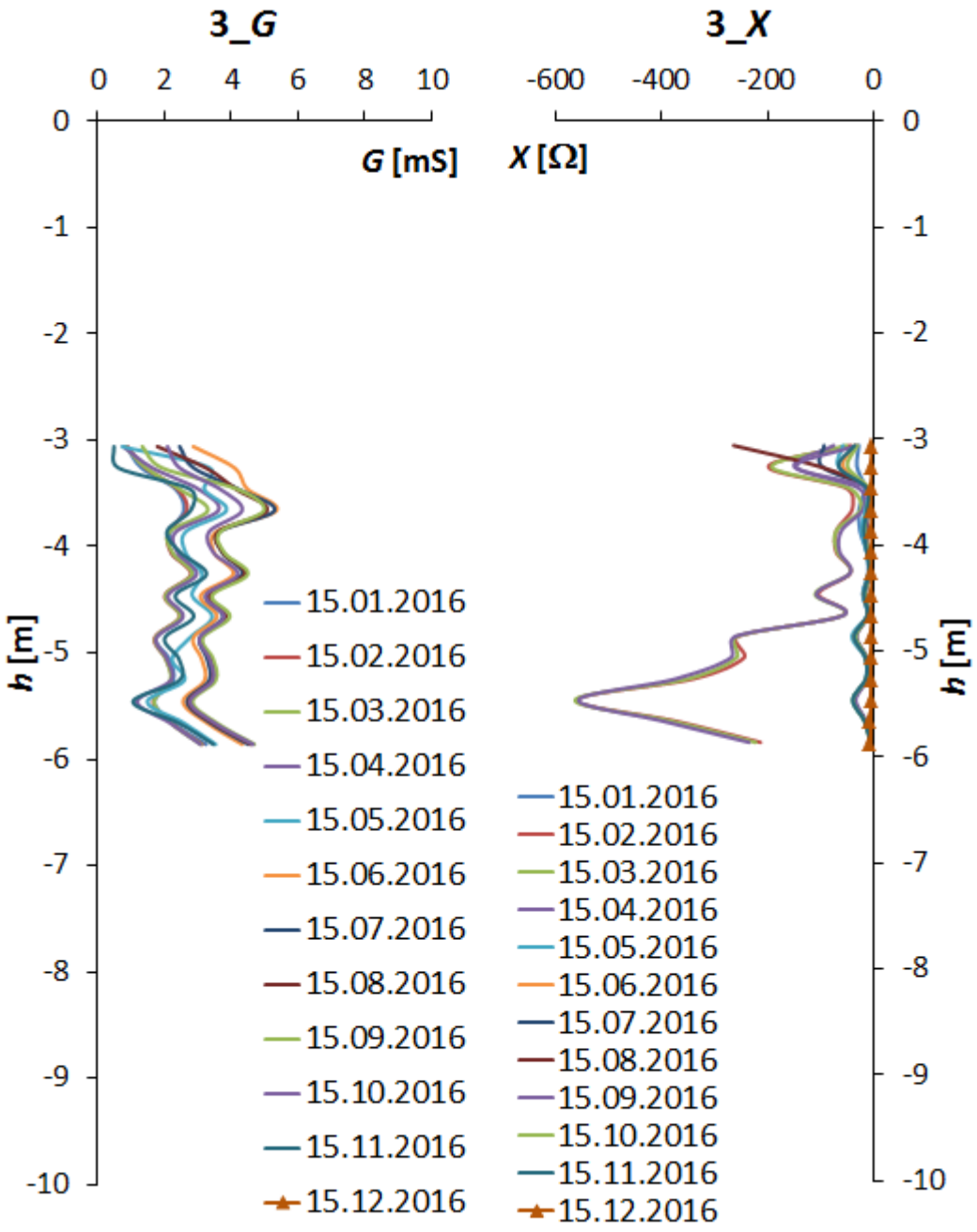
Časově diskrétní průběhy hodnot elektrické vodivosti *G* a reaktance *X* zeminy hráze byly hodnocené vždy v polovině měsíce ve 13 hod. (Obr. 10.6) V měsících lednu až listopadu obecně nevykazují výrazné změny. V případě sondy celkové délky 10 m (Obr. 10.6a) je zřejmý vliv aplikace Nutrolázy v měsíci květnu 2016, a to výrazným zvýšením hodnot *G* v úrovni -2,8 m a především v úrovni -3,4 m. Jedná se o úrovně, které korespondují se spodní částí perforovaných trubic (Obr. 10.7), do nichž se v uvedeném měsíci dávkoval vodný roztok Nutrolázy. Další extrémy vykazují křivky v průběhu celého

roku 2016 v úrovních -7,1 m a -9,3 m, kde se jedná o minimální měřené hodnoty *G* a v úrovni -8,2 m o maximální hodnoty. Za povšimnutí stojí také skutečnost, že maximální měřené hodnoty *G* v úrovni -8,2 m jsou v průběhu celého roku 2016 o 5,4 % nižší než hodnota měřená v úrovni -3,4 m v měsíci květnu 2016 (tj. v průběhu realizace technologie BioSealing), avšak v uvedeném měsíci bylo v této úrovni zaznamenáno zmenšení hodnot *G* o 4,0 % oproti hodnotám z celého roku. Pokud se jedná o průběh hodnot reaktance *X* je patrný, již komentovaný, jejich rozptyl do hloubky -2,5 m, který je v uvedené úrovni s největší pravděpodobností způsoben materiálem s rozdílnou zrnitostí. Další extrémy průběhu reaktance *X* korelují s extrémy zaznamenanými i v průběhu *G*, jejich absolutní hodnoty však jsou v průběhu roku proměnné.

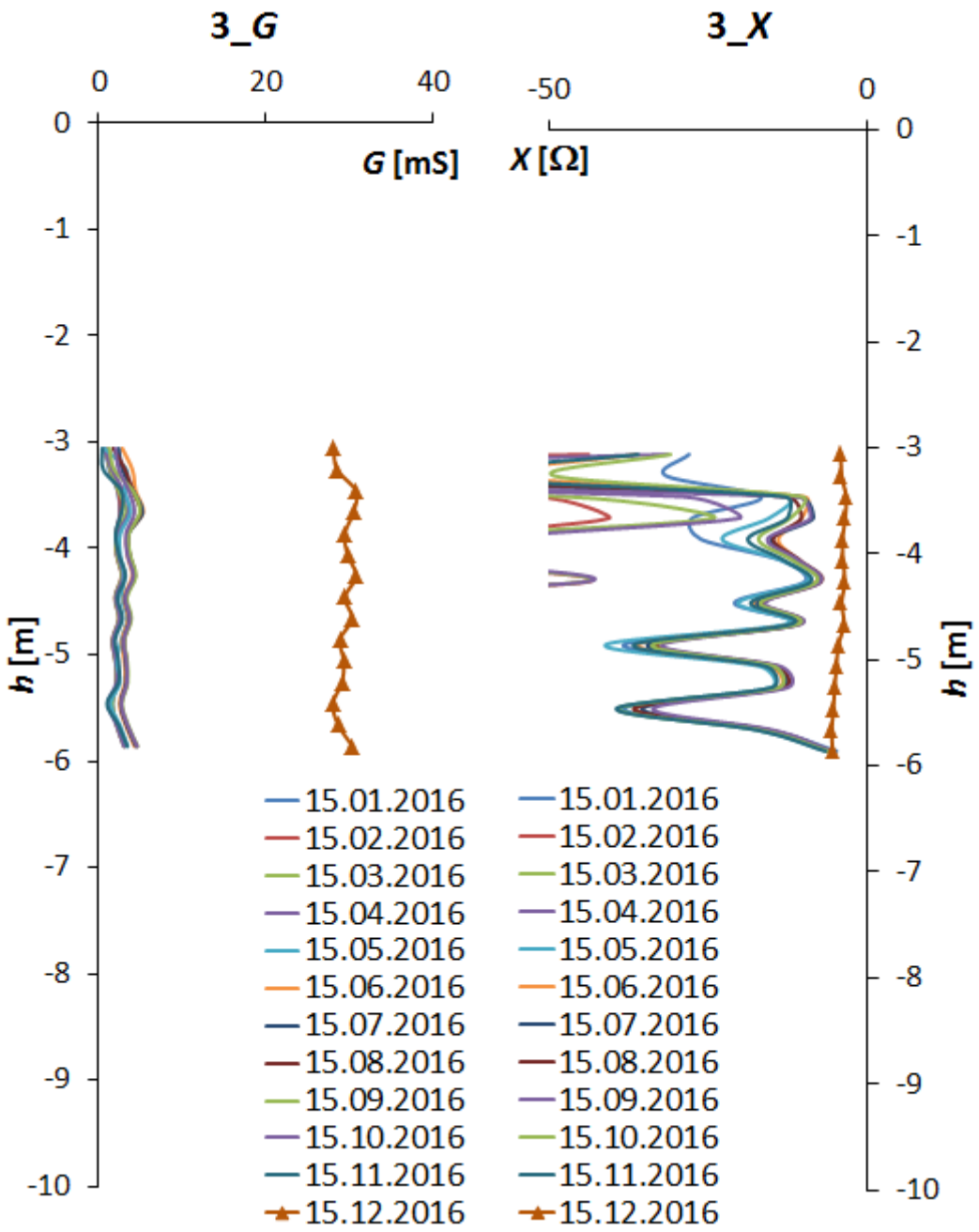
V případě sondy celkové délky 3 m (Obr. 10.6b) je kromě měsíce prosince průběh hodnot *G* i *X* z kvalitativního hlediska obdobný po celý rok 2016. Vliv aplikace Nutrolázy v roce 2016 je z kvantitativního hodnocení zřejmý zvětšením měřených hodnot *G* v měsíci květnu a setrvání ve vyšších hodnotách až do měsíce listopadu, kdy došlo k výraznému snížení úrovně hladiny vody v nádrži. V měsících únor, březen a duben došlo ke zvětšení hodnot reaktance *X* především v úrovni -5,5 m. Po zahájení aplikace živného roztoku v měsíci květnu se průběh *X* vrací zpět na hodnoty naměřené v lednu 2016. Za povšimnutí stojí, že maximální hodnoty reaktance na sondě délky 10 m pocházejí také z února a března. Hodnoty *G* naměřené v prosinci jsou z kvalitativního hlediska obdobné jako po zbytek roku, jsou však řádově vyšší. Hodnoty reaktance *X* se také pro měsíc prosinec podstatně liší od ostatních měsíců, a to jak kvantitativně, tak kvalitativně. Z důvodu řádové odlišnosti rozsahu hodnot jsou pro sondu délky 3 m zobrazeny dva grafy (Obr. 10.6b a 10.6c). Tuto odlišnost by teoreticky bylo možné vysvětlit vypuštěním nádrže, ale v tom případě by se předpokládalo snížení hodnot *G*. Extrémně vysoké hodnoty elektrické vodivosti korespondují s nízkými hodnotami elektrického odporu zřejmými z Obr. 10. 4d a jak již bylo uvedeno, hodnoty odporu *R* se blížily hodnotě odporu surové vody. Z téměř konstantního průběhu hodnot reaktance *X* je možné usuzovat, že prostředí sondy je nasyceno vodou. Nasvědčují tomu měřené průběhy *R*, *G* a *X* a rovněž skutečnost, že sonda byla do zeminy instalována pouhým manuálním zatlačením (bez nutnosti vyhloubení otvoru). Řádová odlišnost zjištěná v měsíci 12/2016 však může být způsobena i závadou na přenosové trase signálu, kondenzací par v boxu 1 případně námrazou na konektorech apod. Při vizuálním pozorování však nebylo shledáno nic neobvyklého, a proto bude problematika dále sledována.



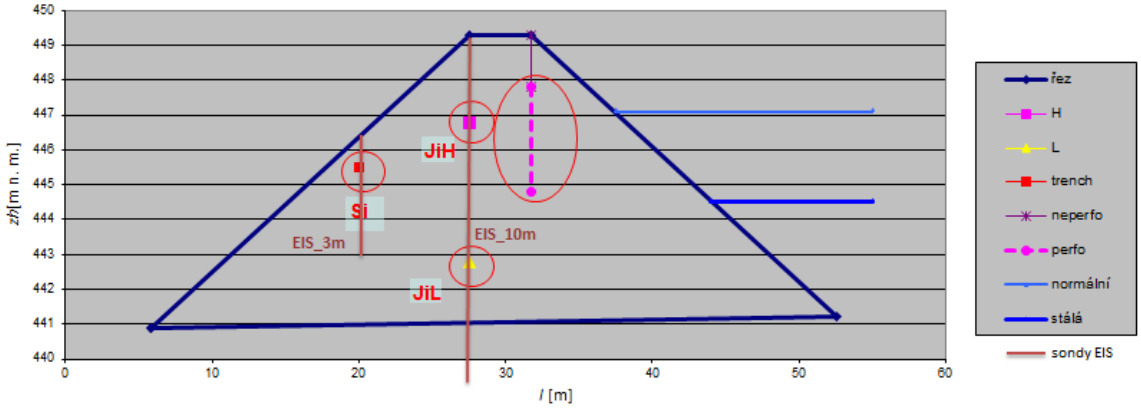
Obr. 10.6a Průběhy hodnot *G* a *X* na sondě délky 10 m vyhodnocené vždy 15. den v měsíci ve 13 hod.



Obr. 10.6b Průběhy hodnot *G* a *X* na sondě délky 3 m vyhodnocené vždy 15 dne v měsíci ve 13 hod.



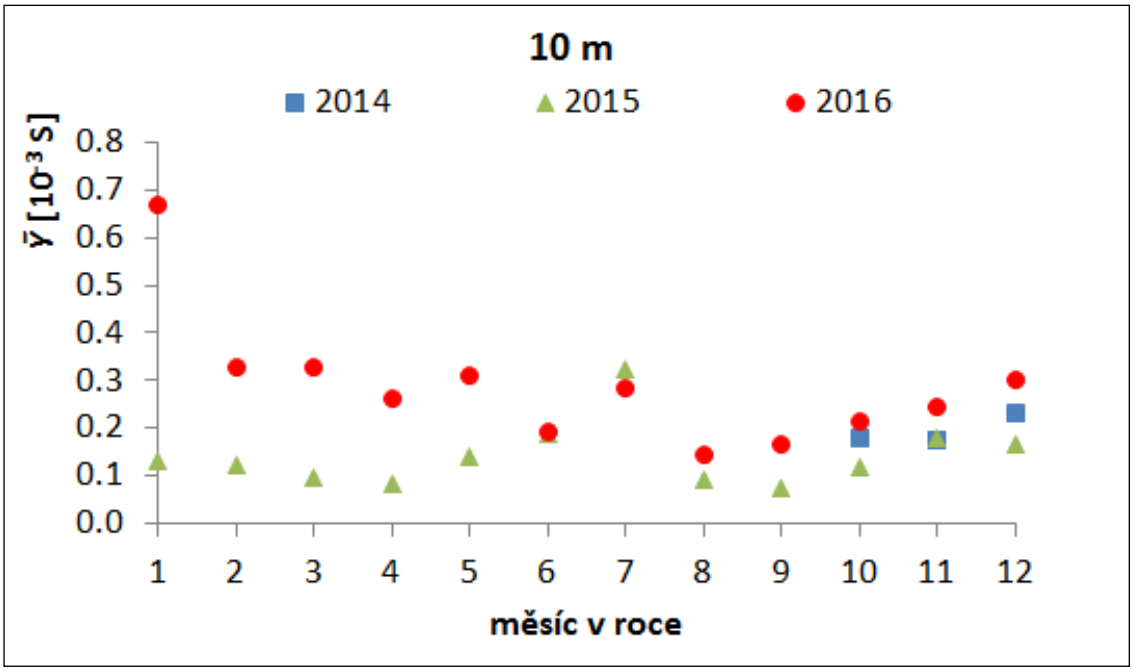
Obr. 10.6c Průběhy hodnot G a X na sondě délky 3 m vyhodnocené vždy 15 dne v měsíci ve 13 hod, přizpůsobený rozsah



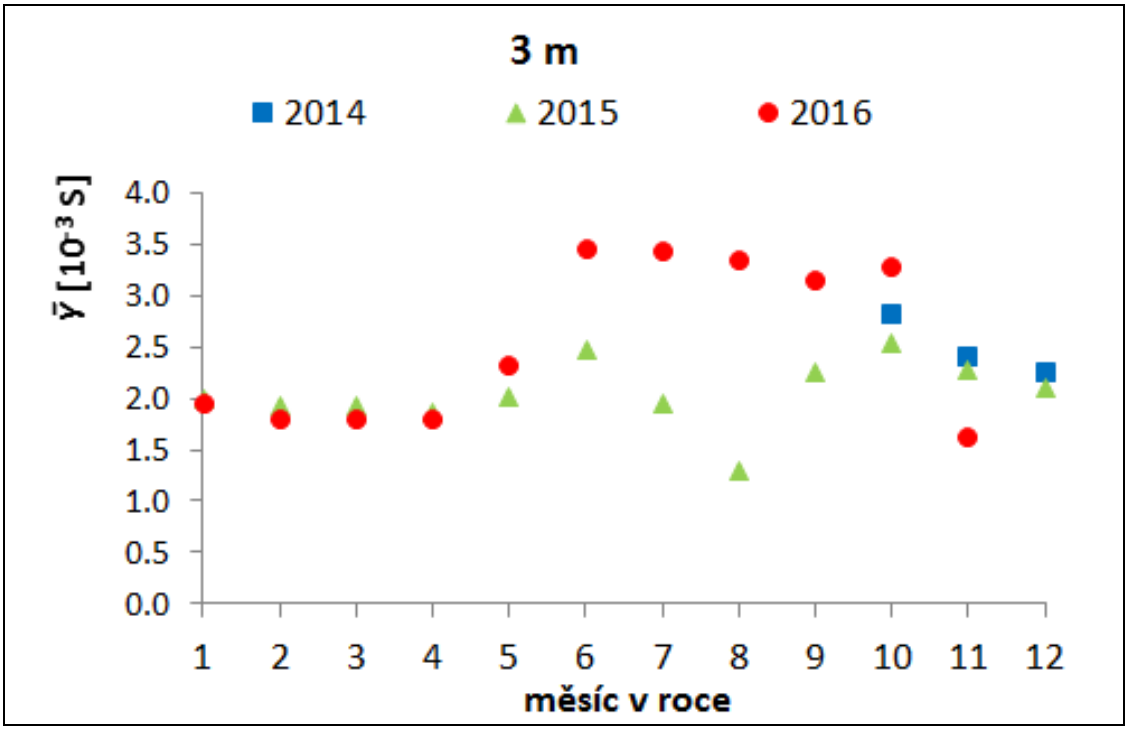
Obr. 10.7 Schématický řez hrází s umístěním měřicích prvků

10.2.3 Změny průměrné admitance

Admitance $\bar{Y}$ je veličina, která ve své hodnotě zohledňuje vliv proměnlivého obsahu vody i případné strukturální změny zeminy hráze. Průběhy průměrné admitance $\bar{Y}$ (Obr. 10.8) jsou stanoveny v jednotlivých měsících roku 2016 aritmetickým průměrem hodnot zjištěných v jednotlivých úrovních měřených každou sondou. Od měsíce června lze i v tomto případě u sondy celkové délky 10 m konstatovat přibližné zachování kvalitativního i kvantitativního průběhu ve všech měřených měsících a letech, což znamená, že v průměrných hodnotách se v měřeném profilu neprojevuje vliv aplikace technologie BioSealing ani zvětšení či zmenšení úrovně hladiny vody v nádrži. V první polovině roku 2016 jsou však hodnoty $\bar{Y}$ výrazně vyšší s extrémem v měsíci lednu. V případě sondy celkové délky 3 m je v roce 2016 je zřejmé zvětšení hodnot $\bar{Y}$ od měsíce května, po ukončení aplikace metody BioSealing (měsíce červen až říjen) jsou hodnoty na přibližně konstantní úrovni a v měsíci listopadu je zaznamenáno výrazné zmenšení $\bar{Y}$, které je však zcela jistě způsobeno vypuštěním nádrže za účelem výlovu ryb.



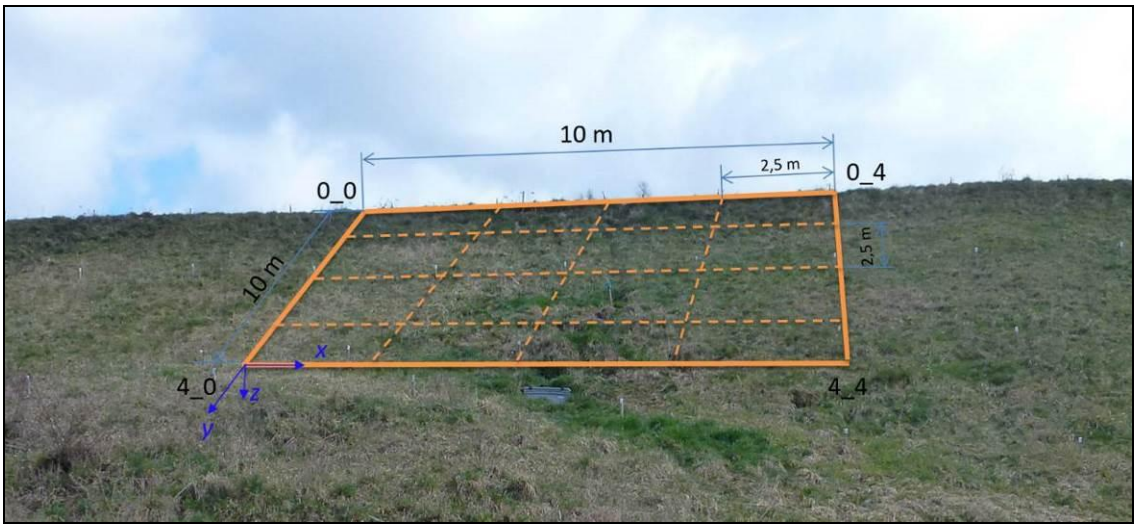
Obr. 10.8a Průběh průměrných hodnot admitance Ȳ měřený v roce 2016 sondou délky 10 m



Obr. 10.8b Průběh průměrných hodnot admitance Ȳ měřený v roce 2016 na sondě délky 3 m

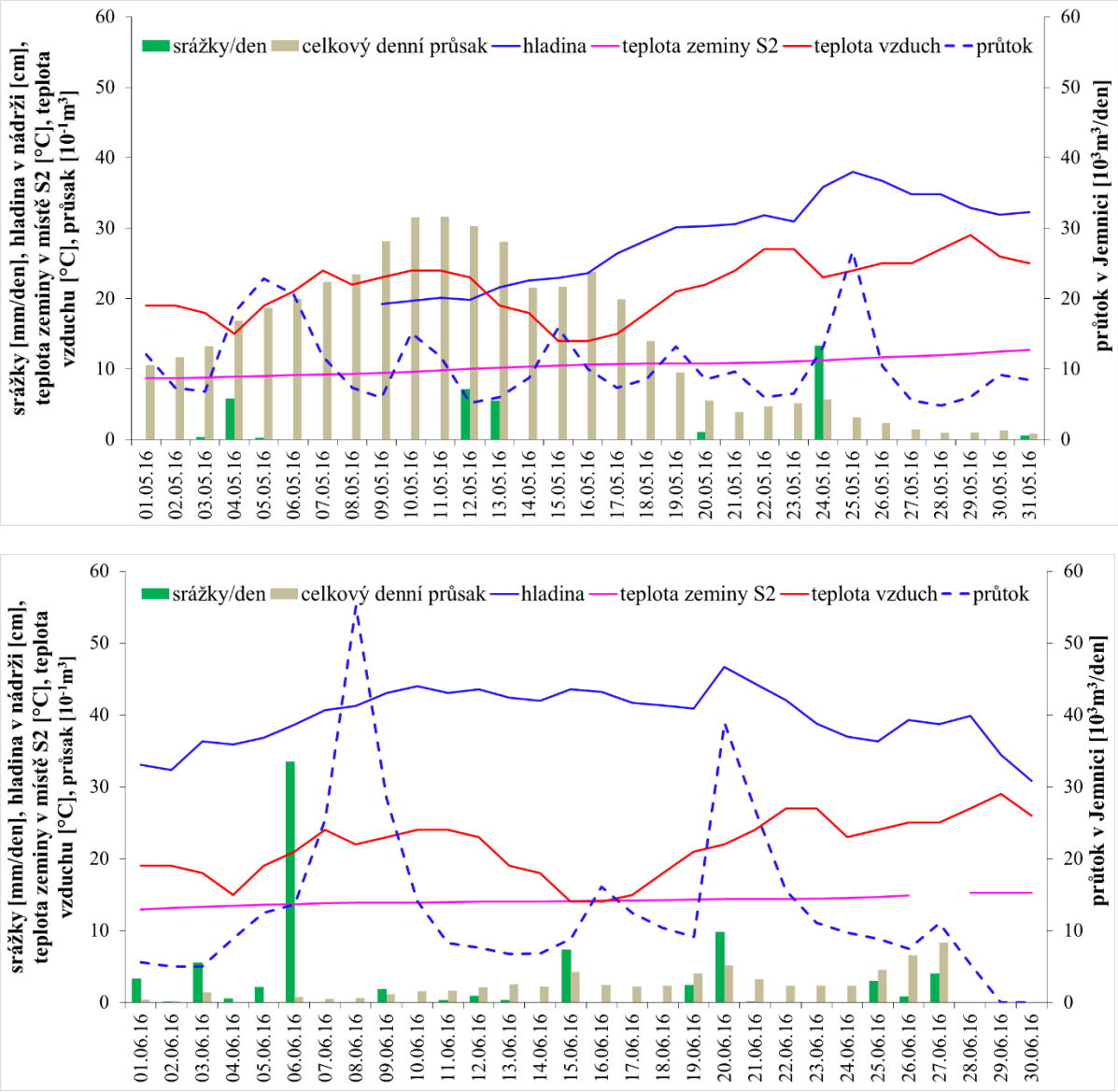
10.2.4 Tvorba map elektrické vodivosti v oblasti výronové plochy

Mapování výronové plochy proběhlo v rastru dle Obr. 10.9. Bylo měřeno ve čtvercové síti se vzdáleností jednotlivých bodů 2,5 m × 2,5 m tj. celkem ve 25 bodech, celková proměřená plocha byla 100 m^2. Na ose *x* je pozice bodu ve směru délky koruny hráze, na ose *y* je pozice bodu na vzdušném líci hráze. Hodnoty elektrické impedance **Z** byly zjišťovány ve čtyřech hloubkách, a to -0,02 m, -0,12 m, -0,22 m a -0,32 m. Měření je vyhodnoceno jako bodové, neboť měření bylo provedeno vidlicovou sondou a vzdálenost elektrod snímače k rozměru měřené oblasti reprezentuje nejistotu 0,6 %.



Obr. 10.9 Situace měřené oblasti výronové plochy

Měření bylo realizováno při frekvenci *f* = 2 000 Hz, hodnota byla zvolena na základě výsledků frekvenční analýzy zeminy hráze, s dobou přepínání mezi měřeními *t* = 0,100 s, počet opakování na jednom snímači je *n* = 5, tj. parametry dlouhodobého měření. Využito bylo dvousvorkové zapojení elektrod na sondě. Měření proběhlo ve dvou termínech, a to 19. 5. 2016 (v průběhu aplikace metody BioSealing) a 22. 6. 2016 (po ukončení aplikace metody BioSealing) z důvodu dokumentace vlivu povětrnostních podmínek a úrovně hladiny vody v nádrži. Protože v místě měření – obec Hornice, není meteorologická stanice, jsou doplňující data získávána od Českého hydrometeorologického ústavu z nejblíže položených stanic – průtoky z limnigrafické stanice Jemnice, tok Želetavka, a protože na stanici není měření srážek, jsou informace o srážkách přejímány ze stanice v Moravských Budějovicích. Společnost GEO*test*, a.s. vybavila monitorovací systém zemní hráze rovněž snímači teploty zeminy (využita jsou data ze snímače S2 umístěného nad výronem vody) a Vysoké učení technické v Brně dne 9. 5. 2016 instalovalo snímač úrovně hladiny v nádrži. Teplota vzduchu je přejata z webových stránek http://www.meteocentrum.cz/predpoved-pocasi/cz/1669/hornice a http://www.e-pocasi.cz/archiv-pocasi/2016/ a korigována údaji získanými od místních obyvatel.



Obr. 10.10 Průběhy sledovaných veličin

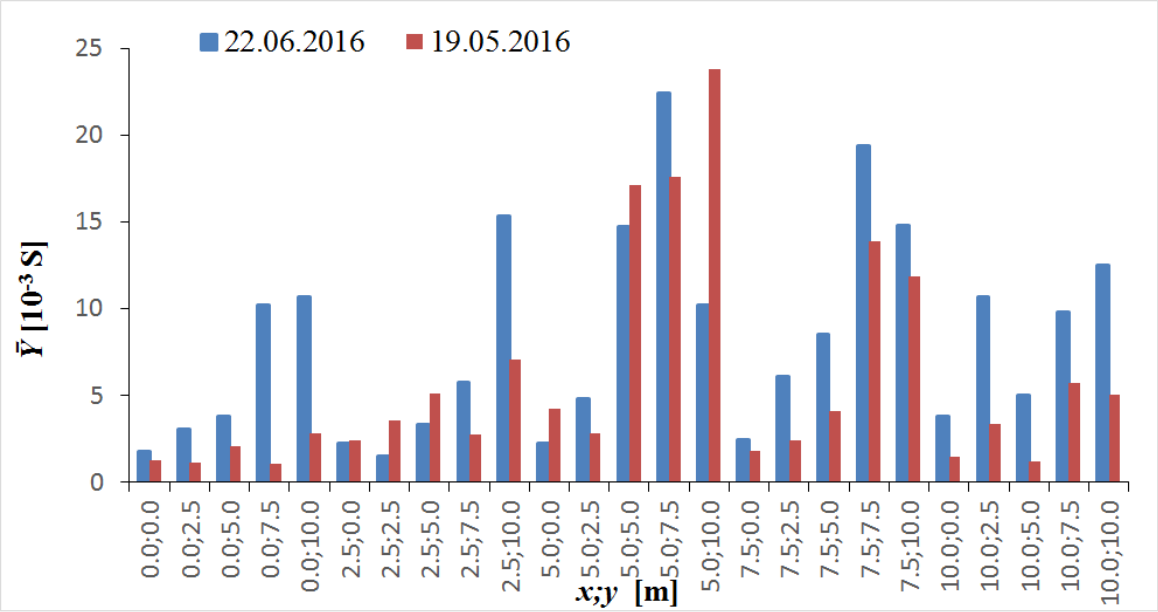
Ačkoli průtok měřený v limnigrafické stanici vykazuje v obou měsících mírně sestupnou tendenci, hladina v nádrži VD Hornice se zvyšuje. Uvedené děje nejsou v rozporu. Na zvýšení hladiny se podílí srážky (Obr. 10.10) a umělé přehrazení pomocného bezpečnostního přelivu realizovaného betonovým žlabem, které bylo realizováno z důvodu aplikace těsnění průsaku tělesem hráze metodou BioSealing. Hrazení bylo realizováno ve dvou krocích, a to 6. 5. 2016 a 2. 6. 2016, 29. 6. 2016 bylo vyhrazeno 0,10 m, čímž dochází k poklesu hladiny v nádrži, neboť byly zaznamenány nulové srážky. Teploty vzduchu i teplota zeminy měřená v místě výronu vykazují v obou měsících vzestupný trend.

Tab. 10.1 Měřené parametry

datum	průtok	průsak	srážky	hladina v nádrži	teplota vzduchu	teplota zeminy
dd.mm.rr	$10^3 m^3$/den	m^3/den	mm	m n. m.	°C	°C
19.05.16	13,2	0,951	0	447,40	21	10,8
22.06.16	15,6	0,233	0	447,52	28	14,4

Zpracování dat

Zpracování změřených dat bylo provedeno v programu MS Excel. Dle zavedeného kartézského systému souřadnic byly pro jednotlivé body vyneseny průběhy elektrické vodivosti *G* stanovené jako aritmetický průměr hodnot z počtu opakování *n* = 5 a průměrná hodnota admitance $\bar{Y}$ stanovená jako aritmetický průměr hodnot admitancí **Y** zjištěných v jednotlivých bodech ve všech hloubkách (Obr. 10.11).



Obr. 10.11 Admitance zeminy měřená v době aplikace technologie BioSealing (červená barva) a po jejím ukončení (modrá barva)

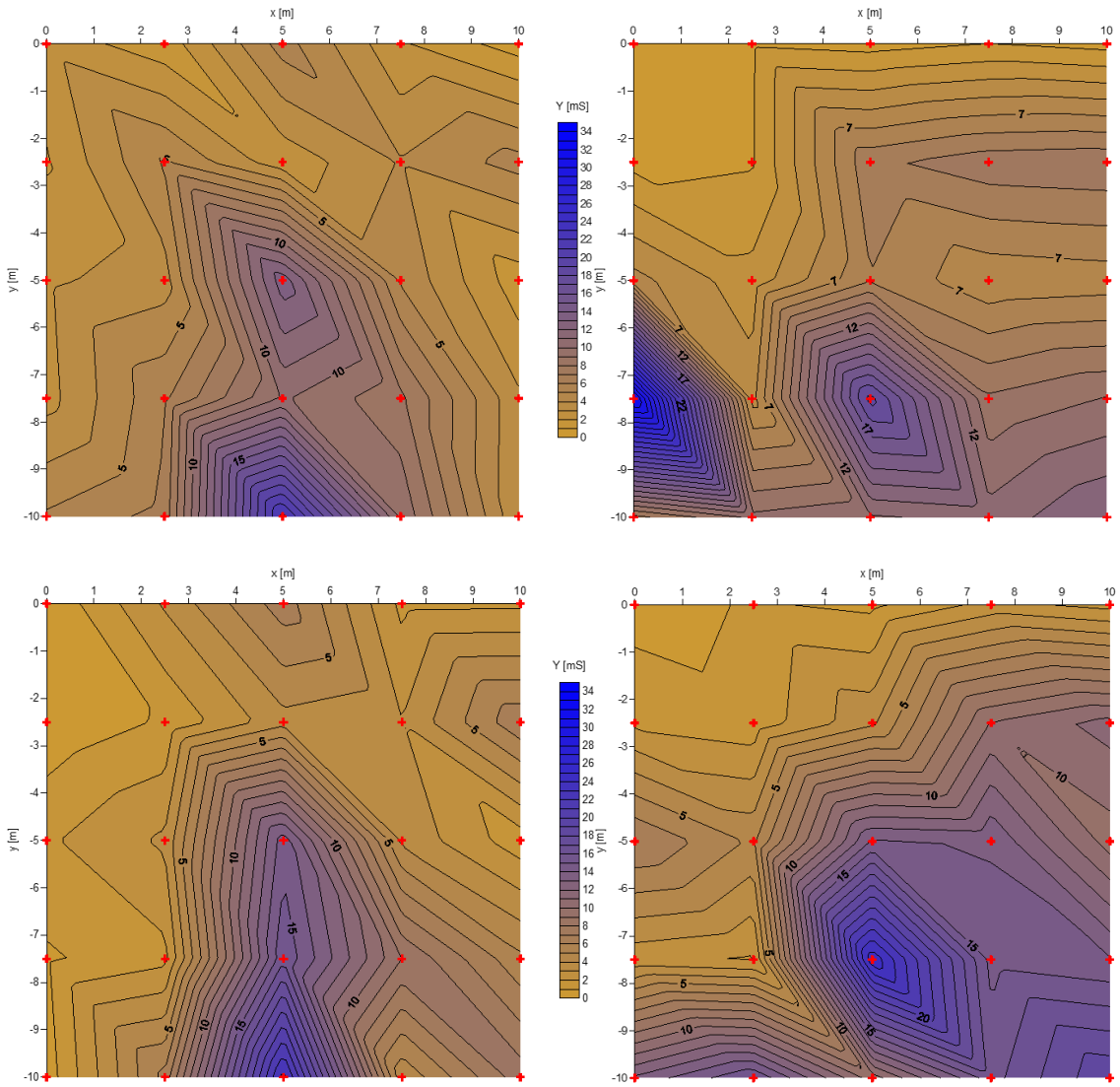
Vyhodnocení měření

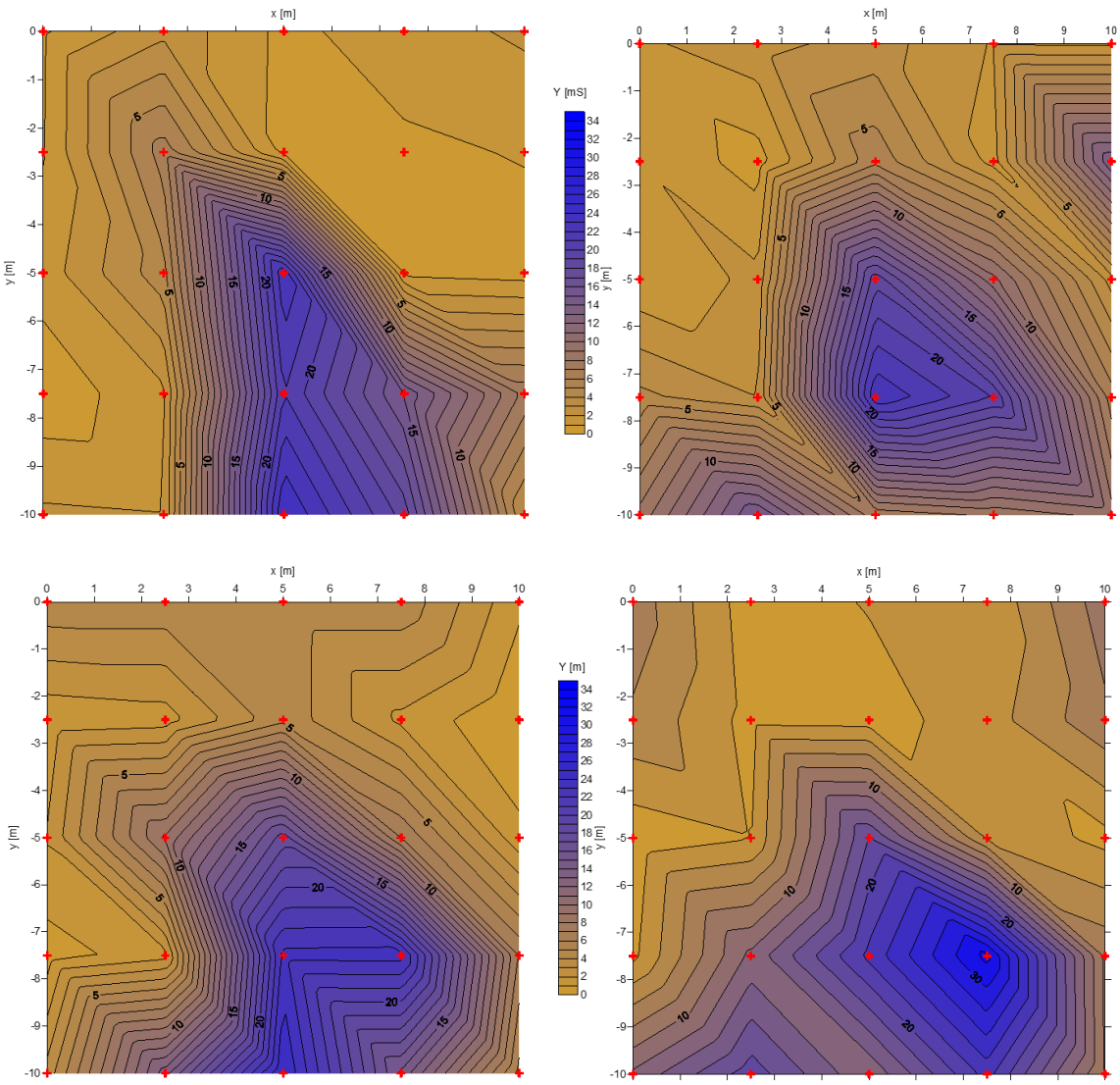
Dne 22. 6. 2016 bylo zaznamenáno zvýšení průtoku o 18,2 %, hladiny vody v nádrži o 39,6 %, teploty vzduchu o 33,3 % a teploty zeminy o 33,3 %. Pravděpodobně v důsledku aplikace metody BioSealing bylo zaznamenáno snížení celkového denního průsaku o 75,5 %, ačkoli srážky byly v obou dnech měření nulové, v měsíci červnu byly před

měřením srážky zaznamenány, zatímco v měsíci květnu měření předcházelo několikadenní sucho. Především vlivem srážek a průsaku vody tělesem hráze byl obsah vody v měřených vrstvách zeminy vyšší přibližně o 27,1 % (dle měřené elektrické vodivosti). Poněvadž se vyhodnocená průměrná hodnota admitance změnila o 40,9 % lze usuzovat i na změnu charakteru zeminy (vliv chemických i mechanických parametrů).

Hodnoty zpracované v programu MS Excel byly načteny do programu Surfer 8. V něm byla provedena triangulace plochy s definovanými body a byly vykresleny izolinie dokumentující výronovou plochu (Obr. 10.14). Barevná škála admitance je pro všechna vyhodnocení jednotná, jednotlivé hloubky jsou zobrazeny ve směru tíhového zrychlení.

19. 5. 2016 **22. 6. 2016**





Obr. 10.12 Mapy admitance zeminy hráze

Z grafických výstupů z programu Surfer 8 je zřejmé prostorové rozložení a změny vlhkosti zeminy (dle měřené admitance) ve sledované oblasti výronové plochy. Například v hloubce -0,12 m je zřejmé zvětšení rozsahu zamokření. V hloubce -0,22 m došlo v oblasti ke snížení *Y*, tedy ke snížení vlhkosti zeminy, naopak v hloubce -0,32 m je zřejmý nárůst hodnot. Je však třeba zmínit, že na rozdíl od květnového měření, červnovému měření předcházely srážky, které pravděpodobně měly vliv na nasycení zeminy na povrchu výronové plochy vodou.

Dosažené výsledky dokazují vhodnost metody EIS a realizované aparatury s mobilní sondou připojenou k přístroji Z-metr IV pro sledování změn charakteristik zemin vyvolaných proměnným zatížením vodou (infiltrovanou ze srážek a vodou průsakovou z nádrže VD). Měření popsanou mobilní sondou je možné realizovat do hloubky 0,34 m. Uvedená hloubka a konstrukce sondy byla vyhodnocena jako maximální vhodná, při níž by nemělo docházet k deformaci snímače např. při jeho instalaci do tvrdé zeminy či zeminy s obsahem kamenů.

Dále lze konstatovat velmi dobrou shodu s ději, které předcházely či byly zaznamenány ve dnech měření. Procentuálně identická shoda byla v měřených dnech zaznamenána při změně teploty vzduchu a teploty zeminy měřené v blízkosti výronu vody. Vyhodnocené změny v ostatních měřených veličinách korelují s ději, které v době měření probíhaly či nastaly. Jedná se především o změnu úrovně hladiny vody v nádrži, vliv dešťových srážek a probíhající proces aplikace metody BioSealing pro těsnění zemní hráze. Je zřejmé, že vlivem uvedených dějů dochází k zatěsnění či naopak tvorbě nových průsakových cest v zemině hráze. Uvedené závěry předpokládají, že jednotlivé prvky neovlivňují měřené složky elektrické impedance, a tím vyhodnocovanou elektrickou vodivost či admitanci.

11 ZÁVĚR

Technologie BioSealing je inovativní metodou sanace zemních těles. Využívá možnosti zamezení průsaku vody skrze zemní konstrukce pomocí stimulace biologické aktivity zemin. Jedná se o technologii vyvinutou nizozemskými společnostmi Deltares a Volker Staal Funderingen. V Nizozemí byla také poprvé testována v laboratoři a následně v terénu (Rupp a kol., 2016). Pilotní projekt v České republice byl realizován na zemní hrázi VD Hornice v kraji Vysočina. Realizační práce aplikace technologie BioSealing v České republice s výhradním právem užití včetně monitorování prováděla společnost GEO*test*, a.s. ve spolupráci s Vysokým učením technickým, Fakultou stavební, Ústavem vodních staveb.

Aplikace technologie BioSealing byla provedena ve dvou etapách dávkování živin. První etapa probíhala od 4. 5. 2015 do 11. 6. 2015. Po dokončení injekčních prací však následovalo nadprůměrně horké léto s téměř nulovým množstvím srážek, kdy hladina vody v nádrži klesla pod úroveň dávkování živné směsi a také pod úroveň pozorovaného výronu vody na vzdušné straně hráze. Z tohoto důvodu nebyla naměřená data natolik průkazná, aby bylo možné ověřit účinek technologie Biosealing, neboť snížení průsaků bylo možné předpokládat i bez její aplikace. V následujících měsících se průsak na vzdušném líci hráze opět projevil, proto bylo rozhodnuto o druhé etapě dávkování živné směsi v roce 2016. Druhá etapa byla zahájena 9. 5. 2016 a ukončena 3. 6. 2016. V rámci diplomové práce jsem pracovala s daty získanými v průběhu roku 2016.

Monitorování VD Hornice metodou EIS bylo realizováno 3 způsoby. Do tělesa hráze byly osazeny 2 odporové sondy (4 paralelně umístěné tyče) pro sledování relativních změn elektrické impedance zeminy (Pařílková a kol., 2015). Dále bylo provedeno monitorování výronové plochy na vzdušním líci hráze pomocí mobilní vidlicové sondy. V květnu 2016 bylo VD Hornice opatřeno snímačem změn úrovně hladiny vody fungujícím na principu EIS, což je pilotní použití metody EIS k tomuto účelu a dosažené výsledky dokazují její vhodnost pro uvedený typ měření. V podmínkách VD Hornice se dokonce snímač EIS ukázal jako spolehlivější než použitý hydrostatický snímač úrovně hladiny vody.

Pro ověření vhodnosti metody EIS ke sledování aplikace technologie BioSealing bylo zvoleno více přístupů. Byla vyhodnocena data získaná ze sond osazených v zemině tělesa hráze, a to na základě průběhů rezistance R v jednotlivých úrovních na sondách, změn průměrné admitance $\bar{Y}$ zeminy a průběhů hodnot elektrické vodivosti G a reaktance X naměřených vždy 15. den v měsíci ve 13 hod. Dále byla porovnána data naměřená mobilní vidlicovou sondou v oblasti výronové plochy dne 19. 5. 2016 (v průběhu injektáže živného roztoku) a 22. 6. 2016 (19 dnů po jejím ukončení), tato data byla zpracována v programu MS Excel a Surfer 8. Všechny závěry jsou založeny na předpokladu, že aplikací technologie BioSealing ani jiným zásahem v průběhu monitorování nedošlo ke změnám

chemických ani mechanických charakteristik monitorované zeminy a že změny impedančních charakteristik jsou dominantně důsledkem změny stupně nasycení zeminy vodou.

Při diskuzi vyhodnoceného monitorování oblasti výronové plochy mobilní vidlicovou sondou a následného porovnání hodnot admitancí, je nutno opět podotknout, že měření v květnu předcházelo několikadenní sucho, naopak v červnu byly zaznamenány srážky. Mobilní sondou byla impedance **Z** měřena do hloubky -0,32 m, což je úroveň relativně blízko povrchu a může být snadno ovlivněna infiltrací srážek, případně mechanickým zatížením. Dle měřené elektrické vodivosti došlo ke zvýšení množství vody v pórech přibližně o 27 %. Poněvadž se vyhodnocená průměrná hodnota admitance změnila o 40,9 % lze usuzovat i na změnu charakteru zeminy (vliv chemických i mechanických parametrů).

Obr. 11.1 Měření průsaku (21. 3. 2016, 22. 6. 2016 nahoře a 3. 8. 2016, 17. 10. 2016 dole)

Profil měřený sondami metody EIS se nachází vpravo od pozorovaného výronu vody. Průsak je měřen kontinuálně, kdy voda je do jímací nádoby s měřidly přiváděna dvěma trubkami (Obr. 11.1). Již v průběhu procesu sanace hráze technologií BioSealing bylo

možno v trubkách pozorovat zmenšení průtoku prosakující vody. Před zahájením sanace hráze dne 9. 5. 2016 byl měřen celkový průsak 2,817 m^3/den., po sanaci hráze dne 22. 6. 2016 byl průsak 0,233 m^3/den, což představuje více než 90 % změnu jeho hodnoty při zachování úrovně hladiny vody v nádrži. Poněvadž se však jedná o prostorový děj, vegetace v místě výronové plochy byla po celou dobu monitorování velmi vitální (Obr. 11.2) a dne 22. 6. 2016 v ní byly pozorovány užovky, které mají obecně rády vlhkost, je možné, že může částečně docházet i k obtékání jímacího systému.

Na základě průběhů rezistance *R* v jednotlivých úrovních, lze aplikaci technologie BioSealing v určité úrovni zemní hráze VD Hornice považovat za úspěšnou, dochází-li z dlouhodobého hlediska ke zvýšení hodnot rezistance *R* v této úrovni. Při globálním pohledu na průběhy měřených hodnot na sondě celkové délky 3 m je zřejmé, že aplikací vodného roztoku Nutrolázy došlo k poklesu rezistance *R* vlivem nasycení zemního tělesa tímto vodným roztokem. Přestože v některých hloubkách došlo po aplikaci technologie BioSealing k mírnému navýšení hodnot, nevrátily se tyto hodnoty ani na původní úroveň, tedy úroveň před injektáží živného roztoku do tělesa hráze. Dobře patrný je projev dávkování Nutrolázy ve všech úrovních také na sondě celkové délky 10 m. Ani zde se však hodnoty *R* ve většině úrovní následně nevracejí na původní hodnoty. Z uvedeného vyplývá, že aplikace technologie BioSealing se jednoznačně projevila, nelze však konstatovat její velkou úspěšnost, protože se zdá, že těleso hráze zůstalo nasyceno vodou více, než bylo před zahájením sanace.

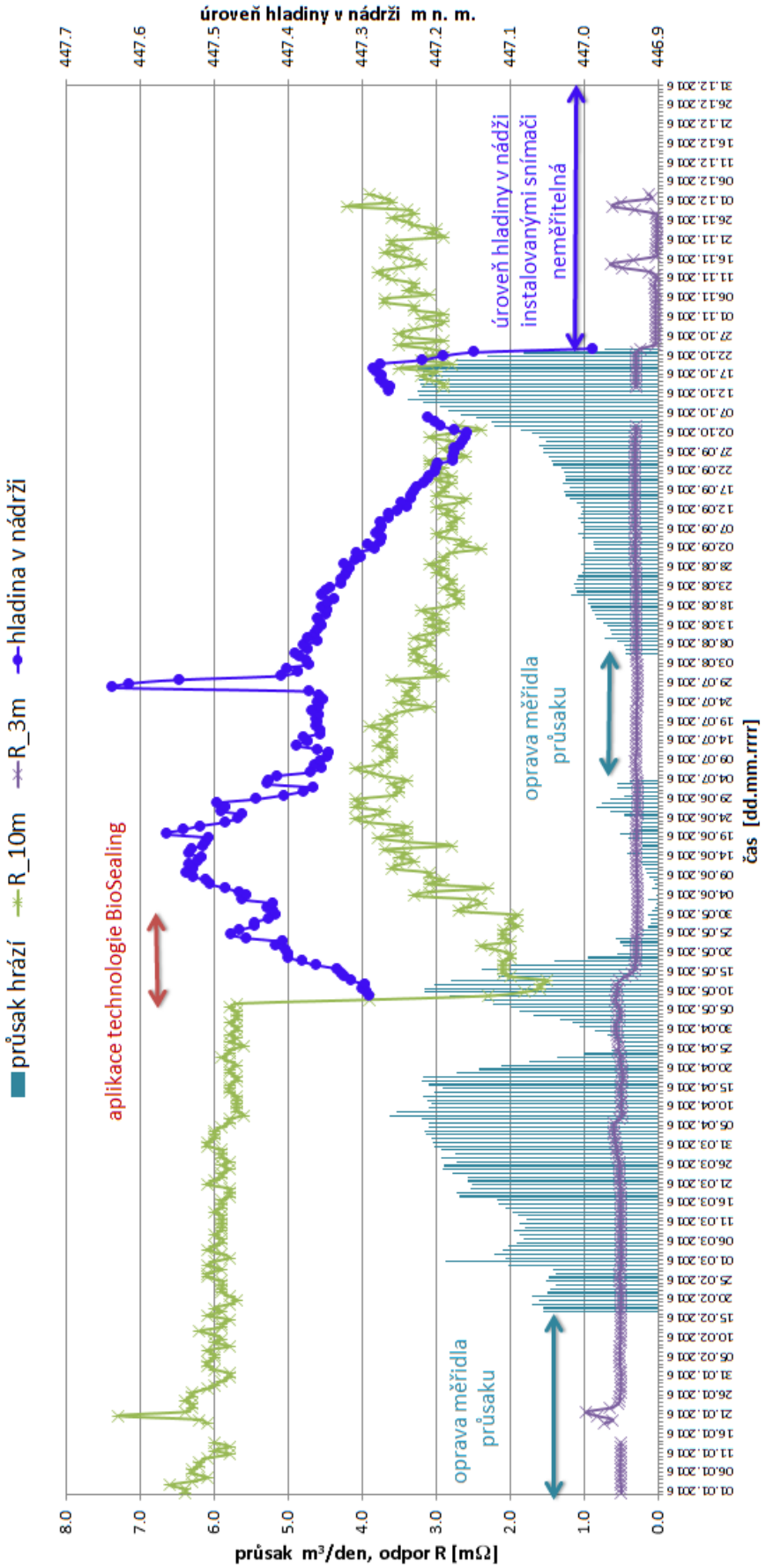
Obr. 11.2 Travní pokryv na výronové ploše

Při pohledu na průběhy hodnot elektrické vodivosti *G* a reaktance *X* je opět patrný vliv aplikace roztoku Nutroláza. Následně však nedošlo k výraznému snížení hodnot *G*, které by se dalo přepokládat v případě, že by byl snížen průsak a tím obsah vody v zemině. V případě sondy délky 3 m naopak došlo po aplikaci technologie BioSealing ke zvýšení hodnot *G* a tím tedy pravděpodobně ke zvýšení stupně nasycení vodou a tyto hodnoty klesly na původní úroveň až v listopadu, a to téměř jistě vlivem vypuštění vody z nádrže. Na sondě délky 10 m se vliv aplikace technologie BioSealing výrazně projevil pouze zvýšením hodnot *G* v úrovních dávkování vodného roztoku. Obdobné závěry lze vyvodit také z průběhu hodnot průměrné admitance zeminy hráze, kde na sondě délky 10 m se dávkování Nutrolázy příliš neprojevilo, na sondě celkové délky 3 m došlo ke zvýšení průměrné admitance a její pokles byl zaznamenán až následkem vypouštění vody z nádrže. Stanovené závěry odpovídají posouzení na základě průběhů hodnot rezistance *R*.

Obecněji však lze konstatovat, že zeminy s jemnými póry obsahují vodu elektricky vodivější než propustnější zeminy, v nichž voda necirkuluje a přijímá ionty. Neboli jílovitá zemina bude za stejných podmínek obsahovat vodu vykazující větší elektrickou vodivost než zemina štěrkovitá. Mechanismus technologie Biosealing počítá s tím, že dojde k zatěsnění průsakových cest uvolněnými jemnozrnnými částicemi zeminy spojenými bakteriálním šlemem. S přihlédnutím k tomuto faktu by bylo možné uvažovat, že celkové snížení rezistance (které koresponduje se zvýšením vodivosti) souvisí kromě stupně nasycení zeminy vodou také s celkovým zmenšením velikosti pórů v zemině.

Všechna předchozí tvrzení jsou doplněna grafem na Obr. 11.3. Zde jsou zobrazeny naměřené celkové průsaky v jednotlivých dnech roku 2016, doplněny o průběh úrovně hladiny vody v nádrži a průběhy průměrných denních rezistancí na obou sondách. Z grafu je zřejmé výrazné snížení celkového denního průsaku vzápětí po aplikaci technologie BioSealing. Celkový denní průsak se však následně opět postupně zvyšoval a v průběhu měsíce října opět prudce vzrostl až na původní hodnoty. Tyto poznatky korespondují se stále sníženými hodnotami průměrných rezistancí. K opětovnému snížení množství prosakující vody z nádrže došlo teprve vlivem snižování úrovně hladiny vody.

Dle informací ze společnosti GEO*test*, a.s. bylo rozhodnuto o další etapě dávkování živného roztoku v průběhu jara 2017, jakmile teplota zeminy dlouhodobě vzroste nad 8 °C, z důvodu zajištění vhodných podmínek pro stimulaci bakteriální aktivity.



Obr. 11.3 Graf průsaku vody z nádrže

Technologie BioSealing je nová metoda sanace zemních těles a je stále rozvíjena v různých podmínkách aplikace. Její úspěšnost může být dána řadou faktorů. Zcela zásadní jsou vlastnosti zeminy a prostorová proměnnost jejich parametrů, kterou je obtížné v rámci průzkumných prací postihnout. Dalšími faktory jsou například úroveň hladiny vody v nádrži, množství injektovaného živného roztoku a jeho koncentrace a složení nebo množství vody pro následné proplachování vrtů. Práce s těmito parametry zajištění jejich optimálnosti v místních podmínkách VD Hornice bude nadále předmětem výzkumu a dlouhodobého monitorování.

Měřicí metoda elektrické impedanční spektrometrie včetně aparatury s přístrojem Z-metr IV realizovaná mezinárodním projektem E!7614 v programu EUREKA byla pro uvedenou aplikaci použita nově, a to včetně přenosu dat komunikačním modulem GSM či snímače pro měření úrovně hladiny vody v nádrži vycházejícího z metody EIS. Aparatura je založena na nepřímé měřicí metodě a už z toho principu vyplývá nutnost její kalibrace na sledované veličiny (teplota, vlhkost, hydraulická vodivost apod.). V případě měření úrovně hladiny vody v nádrži bylo nutno provést kalibraci měřených složek elektrické impedance na výšku vodního sloupce v měřicím válci. Kalibrace se však prováděla, a zpravidla vždy provádí, v laboratorních podmínkách při konstantní teplotě, vlhkosti a tlaku vzduchu. To především při dlouhodobých měřeních v polních podmínkách zajistit nelze. A přestože byl měřicí válec se snímači úrovně hladiny vody z důvodu eliminace teplotních změn umístěn do ochranného obalu, měření zejména v letních měsících ukázala, že k ovlivnění dochází. Proto byly po dobu monitorování sledovány i další veličiny, jako např. teplota vzduchu, srážky, průtok vody na limnigrafické stanici v Jemnici atd. A v případě měření úrovně hladiny vody v nádrži byla opět na základě měřené teplotní závislosti složek elektrické impedance prováděna korekce měřených hodnot na teplotu, čímž byl její vliv eliminován. V práci je dále diskutována situace, která nastala při vypouštění nádrže na měřicí sondě délky 3 m. Dle informací místních obyvatel vypouštění nádrže neprobíhalo bez problémů, neboť výpustní potrubí bylo zcela zanesené a zpočátku se nezadařila ani manipulace výpustním uzávěrem. Je tedy v současné chvíli skutečně obtížné stanovit, zda je problém na trase přenášeného měronosného signálu, nebo je změna důsledkem manipulace na vodním díle.

Závěrem lze konstatovat, že byly a jsou v polních podmínkách ověřovány dvě inovativní metody při jejich zcela ojedinělé aplikaci. Obě metody se vzájemně velmi dobře doplňují a dle mého názoru mají potenciál pro využití v hydrotechnické praxi, kdy jsou ověřovány při sanaci průsaku zemní hráze VD Hornice.

V Brně dne 9. 1. 2017

……..…….

podpis

12 POUŽITÁ LITERATURA

ČSN 75 2410. (2011). Malé vodní nádrže.

DOLEŽAL, Petr. GOLÍK, Pavel. ŘÍHA, Jaromír. TORNER, Václav. ŽATECKÝ, Stanislav. *Malé vodní a suché nádrže*. Vyd. 1. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2011., 108 s. ISBN 978-80-86364-16-2

EUREKA 2013: 1st conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!7614 : October 30 to November 1, 2013: Karolinka, Czech Republic. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUM, 2013, 275 s. ISBN 978-80-214-4735-6.

HEJTMAN, Zdeněk. *PASPORT vodní nádrže "Hornice" na p.č. 124/33, k.ú. Hornice. A.1. Souhrnná a technická zpráva*. 2012, 8 s.

HLADNÝ, J., 2005. *Katastrofální povodeň v České republice v srpnu 2002*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, ISBN 80-721-2350-5.

HORSKÝ, O., BLÁHA, P., 2011. *The application of engineering geology to dam construction, or, What experience has thaught us*. 1st ed., rev. and extended ed. of Czech version. Ostrava: Repronis, c2011, 296 s. ISBN 978–80–7329–278–2.

JANDORA, Jan. ŘÍHA, Jaromír. *Porušení sypaných hrází v důsledku přelití.* Vyd. 1. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2002, 188 s. ISBN 80-86433-15-5

KEAREY, P., BROOKS,M., HILL, J., 2002. *An introduction to geophysical exploration*.3rd ed.

KRATOCHVÍL, Jiří. STARA, Vlastimil. *Přehrady.* Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 1990, 225 s. ISBN 80-214-0004-3

OCHABA, Š., 1986. *Geofyzika. Základy fyziky zeme a jej kozmického okolia*. 1. vyd. Bratislava: Slov. pedag. nakl.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. *EUREKA 2013: 1st conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!4981 : October 30 to November 1, 2013: Karolinka, Czech Republic*. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUM, 2013, 275 s. ISBN 978-80-214-4735-6.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. *EUREKA 2015:3rd conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!7614 : October 15 to 1,. 2015: Jaroměřice nad Rokytnou, Czech Republic*. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUM, 2015, 372 s. ISBN 978-80-214-5149-0.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. *EUREKA 2016:4th conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!7614 : October 13 to 14, 2016: Lednice, Czech Republic*. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUM, 2016, 415 s. ISBN 978-80-214-5338-8.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. ZACHOVAL, Zbyněk, VESELÝ Jaroslav, RUPP, David. *Monitoring of the earthen dam of the Karolinka reservoir by the EIS method*. *EUREKA 2012,* ISBN 978-80-214-4537-6, pp. 104-118.

RUPP, David., 2013. *Zavedení nové technologie zamezující průsakům a únikům vody tělesem přehradních hrází*. Projekt řešený v programu Inovace, poskytovatele MPO. Dostupné
z http://www.geotest.cz/sluzby/vyzkum-a-vyvoj/.

RUPP, David. Data poskytnutá společností GEOTest, a.s., 2016

ŘÍHA, Jaromír. *Hydrotechnické stavby II*. *Studijní opora.* Modul 01, 160 s.

SHERIFF, R. E., 1989. *Geophysical methods*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, ISBN 01-335-2568-6.

SMITH, N., 1972. *A history of dams*. Citadel Press, Firsth edition. New York, USA: ISBN 978-080-6502-915.

ŠÁLEK, Jan. *Malé vodní nádrže v životním prostředí.* Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 1996, 141 s. ISBN 80-7078-370-2

ŠÁLEK, Jan. MIKA, Zdeněk. TRESOVÁ, Anna. *Rybníky a účelové nádrže.* Vyd. 2. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1983, 231 s. ISBN 978-80-01-04002-7

ŠÁLEK, Jan. *Rybníky a účelové nádrže*. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2001, 125 s. ISBN 80-214-1806-0

ŠÁLEK, Jan. *Vodní hospodářství krajiny I.* Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1997, 152 s. ISBN 80-214-0949-5

TELFORD, W., 1990. *Applied geophysics*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 05-213-3938-3.

VOTRUBA, L., BROŽA, V., KAZDA, I., 1978. *Přehrady*. Praha: Nakladatelství ČVUT.

VRÁNA, Karel. BERAN, Jan. *Rybníky a účelové nádrže*. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 150 s. ISBN 987-80-01-04-002-7

Vyhláška č. 471/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva zemědělství o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly

ZACHOVAL, Z., 2016. *Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti vybraných hydrotechnických konstrukcí*. Standardní projekt specifického výzkumu FAST-S-16-3757. VUT v Brně, FAST.

ŽATECKÝ, S., 2013. *Poruchy hrází malých vodních nádrží*. Příspěvek na konferenci Vodní nádrže 2013. Brno.

12.1 DALŠÍ POUŽITÉ ZDROJE

[1] www.verkon.cz/inkubator-mini

[2] http://www.veda.cz/article.do?articleId=12856

[3] http://zmeter-hornice.dioda.cz/

[4] http://www.cressto.cz

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Zatřídění zemin (ČSN 75 7410) 22

Tab. 2.2 Orientační fyzikálně mechanické vlastnosti zhutněných zemin (ČSN 75 2410) 23

Tab. 2.3 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází (ČSN 75 2 410) (ČSN 75 2410) 26

Tab. 5.1 Základní parametry přístroje Z-metr IV 40

Tab. 7.1 Základní technické parametry VD Hornice (Hejtman, 2012) 47

Tab. 10.1 Měřené parametry 84

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Letecký pohled na rybník Rožmberk po výlovu (ČSN 752410) 13

Obr. 2.1 Průtočná MVN u obce Hornice 19

Obr. 2.2 Neprůtočná MVN monitorovaná metodou EIS – soukromý rybník u obce Jevíčko (2.12.2011) 20

Obr. 2.3 Půdorysný tvar hrází 20

Obr. 2.5 Diagram plasticity (pro částice < 0,5 mm) (ČSN 75 2410) 21

Obr. 2.6 Mezní křivky zrnitosti zemin vhodných pro budování zemních přehradních hrází [Kratochvíl a Stara, 1990)] 23

Obr. 2.7 Homogenní hráz na nepropustném podloží (1 - opevnění, 2 - filtr, 3 - nepropustné podloží, 4 - patní drén, 5 - drenážní potrubí) (ČSN 75 2410) 24

Obr. 2.8 Nehomogenní hráz se středním těsněním (1 – opevnění, 2 – drenážní prvek, 3 – skalní podloží, 4 – betonová vyrovnávací vrstva, 5 – betonová zavazující ostruha, 6 – těsnící prvek v podloží) (ČSN 75 2410) 25

Obr. 3.1 Potup porušení sypané zemní hráze v důsledku přelití (Jandora a Říha, 2002) 30

Obr. 3.2 Mechanizmus kontaktní sufoze (Říha, 2008) 31

Obr. 3.3 Postup porušení zemní hráze v důsledku filtrační deformace (Jandora a Říha, 2002) 31

Obr. 5.1 Grafické znázornění fázoru elektrické impedance 37

Obr. 5.2 Schéma měření pro určení elektrických parametrů zeminy 38

Obr. 5.3 Přístroj Z-metr IV, příklad konstrukce sond a jejich instalace 39

Obr. 6.1 BioSealing je založen na kombinaci mikrobiologických a biochemických procesů 41

Obr. 7.1 Situace VD Hornice 45

Obr. 7.2 Závlahová stanice 46

Obr. 7.3 Výronová plocha na vzdušném líci hráze 46

Obr. 7.4 Boční a pomocný přeliv (vlevo), zdrsněný skluz a vývar (vpravo) 47

Obr. 7.5 Provádění vrtných prací z koruny hráze 48

Obr. 8.1 Hloubení injekčních vrtů pro aplikaci živné směsi 50

Obr. 8.2 Injekční vrty pro aplikaci živné směsi 50

Obr. 8.3 Monitorovací stanice průsaku (15. 07. 2015) 51

Obr. 8.4 Měření průsaku (9. 11. 2015 – nahoře, 21. 3. 2016 – dole) 52

Obr. 8.5 Přehrazení pomocného přelivu 53

Obr. 8.6 Dávkování živné směsi pracovníky společnosti GEO*test*, a.s. 53

Obr. 9.1 Instalace 10 m dlouhé sondy metody EIS soupravou Pagani (Pařílková a kol., 2015) 55

Obr. 9.2 Vzájemná pozice tyčí sond metody EIS (Pařílková a kol., 2015) 56

Obr. 9.3 Rozvod kabeláže a kontrolní manuální měření přístrojem Z-metr III 56

Obr. 9.4 Situace vrtů, sond a kabeláže na hrázi VD Hornice (u sond EIS je vyznačen geometrický střed mezi instalovanými tyčemi) (Pařílková a kol., 2015) 57

Obr. 9.5 Jednotka externího přepínače (a), dataloger EIS s modulem přenosu dat (b) .. 58

Obr. 9.6 Princip měření a zapojení snímače hladiny založeného na metodě EIS, vpravo hydrostatický snímač úrovně hladiny ESMWLPS Water level sensor 62

Obr. 9.8 Mini Inkubátor s instalovaným vzorkem 63

Obr. 9.9 Vzorek vody před započetím ohřevu (vlevo) a po ohřevu (vpravo) 64

Obr. 9.10 Teplotní závislost rezistance R a konduktance G vody z nádrže VD Hornice64

Obr. 9.11 Mobilní vidlicová sonda a její instalace při měření 65

Obr. 10.1 Instalace snímačů hladiny na nádrži VD Hornice 66

Obr. 10.2 Průběh hladiny vody v nádrži v korelaci se srážkami a průtoky (průměrně denní hodnoty) 67

Obr. 10.3 Hrazení pomocného přelivu (vpravo), zanášení instalovaného síta (vpravo) 69

Obr. 10.4a Časové změny rezistance *R* na sondě délky 10 m ve všech měřených úrovních 71

Obr. 10.4b Časové změny rezistance *R* na sondě délky 10 m ve vybraných úrovních .. 72

Obr. 10.4c Časové změny rezistance *R* a hladiny vody v nádrži na sondě délky 3 m 73

Obr. 10.5 Úroveň hladiny v nádrži VD Hornice (5. 12. 2016) 75

Obr. 10.6a Průběhy hodnot *G* a *X* na sondě délky 10 m vyhodnocené vždy 15. den v měsíci ve 13 hod. 77

Obr. 10.6b Průběhy hodnot *G* a *X* na sondě délky 3 m vyhodnocené vždy 15 dne v měsíci ve 13 hod. 78

Obr. 10.6c Průběhy hodnot G a X na sondě délky 3 m vyhodnocené vždy 15 dne v měsíci ve 13 hod, přizpůsobený rozsah 79

Obr. 10.7 Schématický řez hrází s umístěním měřicích prvků 80

Obr. 10.8a Průběh průměrných hodnot admitance Ȳ měřený v roce 2016 sondou délky 10 m 81

Obr. 10.8b Průběh průměrných hodnot admitance Ȳ měřený v roce 2016 na sondě délky 3 m 81

Obr. 10.9 Situace měřené oblasti výronové plochy 82

Obr. 10.10 Průběhy sledovaných veličin 83

Obr. 10.11 Admitance zeminy měřená v době aplikace technologie BioSealing (červená barva) a po jejím ukončení (modrá barva) 84

Obr. 10.12 Mapy admitance zeminy hráze 86

Obr. 11.1 Měření průsaku (21. 3. 2016, 22. 6. 2016 nahoře a 3. 8. 2016, 17. 10. 2016 dole) 89

Obr. 11.2 Travní pokryv na výronové ploše 90

Obr. 11.3 Graf průsaku vody z nádrže 92

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka **Název**

EIS……elektrická impedanční spektrometrie

VD……vodní dílo

MVN……malá vodní nádrž

SD .....paměťová karta

LCD .....displej z tekutých krystalů

TBD…… technicko-bezpečnostní dohled

RAM .....Random Access Memory, vyrovnávací paměť počítače

GPS .....Global Positioning System, mobilní navigace

SEZNAM VELIČIN

SYMBOL	NÁZEV	JEDNOTKA
φ	fázový posuv	[-]
A	plocha	[m^2]
C	faktor utěsnění	[-]
d	délka elektrod	[m]
G	elektrická vodivost	[S]
g	tíhové zrychlení	[$m \cdot s^{-2}$]
h	výška vodního sloupce	[m]
H_{max}	hladina maximální	[m]
H_n	hladina provozní	[m]
H_{st}	hladina stálého nadržení	[m]
I	fázor elektrického proudu	[A]
l	vzdálenost elektrod	[m]
P	tlak	[Pa]
Q	průtok	[$m^3 \cdot s^{-1}$]
R	rezistance	[Ω]
S_r	stupeň nasycení	[-]
T	čas	[s]
U	fázor elektrického napětí	[V]
X	reaktance	[Ω]
Y	admitance	[S]
Z	fázor elektrické impedance	[Ω]
ρ	rezistivita	[Ω·m]
ρ'	objemová hmotnost zeminy	[$kg \cdot m^{-3}$]
ρ'_d	objemová hmotnost vysušené zeminy	[$kg \cdot m^{-3}$]
ρ'_s	měrná hmotnost zeminy	[$kg \cdot m^{-3}$]
ρ'_w	měrná hmotnost vody	[$kg \cdot m^{-3}$]
σ	konduktivita	[$S \cdot m^{-1}$]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Ukázka zpracování dat …….. 104

PŘÍLOHA 1 UKÁZKA ZPRACOVÁNÍ DAT

http://zmeter-hornice.dioda.cz/ zmeter-hornice.dioda.cz

leden 2016

1.1	hornice_1601010100.csv	hornice_1601010700.csv	hornice_1601011300.csv	hornice_1601011900.csv
2.1	hornice_1601020100.csv	hornice_1601020700.csv	hornice_1601021300.csv	hornice_1601021900.csv
3.1	hornice_1601030100.csv	hornice_1601030700.csv	hornice_1601031300.csv	hornice_1601031900.csv
4.1	hornice_1601040100.csv	hornice_1601040700.csv	hornice_1601041300.csv	hornice_1601041900.csv
5.1	hornice_1601050100.csv	hornice_1601050700.csv	hornice_1601051300.csv	hornice_1601051900.csv
6.1	hornice_1601060100.csv	hornice_1601060700.csv	hornice_1601061300.csv	hornice_1601061900.csv
7.1	hornice_1601070100.csv	hornice_1601070700.csv	hornice_1601071300.csv	hornice_1601071900.csv
8.1	hornice_1601080100.csv	hornice_1601080700.csv	hornice_1601081300.csv	hornice_1601081900.csv
9.1	hornice_1601090100.csv	hornice_1601090700.csv	hornice_1601091300.csv	hornice_1601091900.csv
10.1	hornice_1601100100.csv	hornice_1601100700.csv	hornice_1601101300.csv	hornice_1601101900.csv
11.1	hornice_1601110100.csv	hornice_1601110700.csv	hornice_1601111300.csv	hornice_1601111900.csv
12.1	hornice_1601120100.csv	hornice_1601120700.csv	hornice_1601121300.csv	hornice_1601121900.csv
13.1	hornice_1601130100.csv	hornice_1601130700.csv	hornice_1601131300.csv	hornice_1601131900.csv
14.1	hornice_1601140100.csv	hornice_1601140700.csv	hornice_1601141300.csv	hornice_1601141900.csv
15.1	hornice_1601150100.csv	hornice_1601150700.csv	hornice_1601151300.csv	hornice_1601151900.csv
16.1	hornice_1601160100.csv	hornice_1601160700.csv		
19.1	hornice_1601191300.csv	hornice_1601191900.csv		
20.1	hornice_1601200100.csv	hornice_1601200700.csv	hornice_1601201300.csv	hornice_1601201900.csv
21.1	hornice_1601210100.csv	hornice_1601210700.csv	hornice_1601211300.csv	hornice_1601211900.csv
22.1	hornice_1601220100.csv	hornice_1601220700.csv	hornice_1601221300.csv	hornice_1601221900.csv
23.1	hornice_1601230100.csv	hornice_1601230700.csv	hornice_1601231300.csv	hornice_1601231900.csv
24.1	hornice_1601240100.csv	hornice_1601240700.csv	hornice_1601241300.csv	hornice_1601241900.csv
25.1	hornice_1601250100.csv	hornice_1601250700.csv	hornice_1601251300.csv	hornice_1601251900.csv
26.1	hornice_1601260100.csv	hornice_1601260700.csv	hornice_1601261300.csv	hornice_1601261900.csv
27.1	hornice_1601270100.csv	hornice_1601270700.csv	hornice_1601271300.csv	hornice_1601271900.csv
28.1	hornice_1601280100.csv	hornice_1601280700.csv	hornice_1601281300.csv	hornice_1601281900.csv
29.1	hornice_1601290100.csv	hornice_1601290700.csv	hornice_1601291300.csv	hornice_1601291900.csv
30.1	hornice_1601300100.csv	hornice_1601300700.csv	hornice_1601301300.csv	hornice_1601301900.csv
31.1	hornice_1601310100.csv	hornice_1601310700.csv	hornice_1601311300.csv	hornice_1601311900.csv

únor 2016

1.2	hornice_1602010100.csv	hornice_1602010700.csv	hornice_1602011300.csv	hornice_1602011900.csv
2.2	hornice_1602020100.csv	hornice_1602020700.csv	hornice_1602021300.csv	hornice_1602021900.csv
3.2	hornice_1602030100.csv	hornice_1602030700.csv	hornice_1602031300.csv	hornice_1602031900.csv
4.2	hornice_1602040100.csv	hornice_1602040700.csv	hornice_1602041300.csv	hornice_1602041900.csv
5.2	hornice_1602050100.csv	hornice_1602050700.csv	hornice_1602051300.csv	hornice_1602051900.csv
6.2	hornice_1602060100.csv	hornice_1602060700.csv	hornice_1602061300.csv	hornice_1602061900.csv
7.2	hornice_1602070100.csv	hornice_1602070700.csv	hornice_1602071300.csv	hornice_1602071900.csv
8.2	hornice_1602080100.csv	hornice_1602080700.csv	hornice_1602081300.csv	hornice_1602081900.csv
9.2	hornice_1602090100.csv	hornice_1602090700.csv	hornice_1602091300.csv	hornice_1602091900.csv
10.2	hornice_1602100100.csv	hornice_1602100700.csv	hornice_1602101300.csv	hornice_1602101900.csv
11.2	hornice_1602110100.csv	hornice_1602110700.csv	hornice_1602111300.csv	hornice_1602111900.csv
12.2	hornice_1602120100.csv	hornice_1602120700.csv	hornice_1602121300.csv	hornice_1602121900.csv
13.2	hornice_1602130100.csv	hornice_1602130700.csv	hornice_1602131300.csv	hornice_1602131900.csv
14.2	hornice_1602140100.csv	hornice_1602140700.csv	hornice_1602141300.csv	hornice_1602141900.csv
15.2	hornice_1602150100.csv	hornice_1602150700.csv	hornice_1602151300.csv	hornice_1602151900.csv
16.2	hornice_1602160100.csv	hornice_1602160700.csv	hornice_1602161300.csv	hornice_1602161900.csv
17.2	hornice_1602170100.csv	hornice_1602170700.csv	hornice_1602171300.csv	hornice_1602171900.csv
18.2	hornice_1602180100.csv	hornice_1602180700.csv	hornice_1602181300.csv	hornice_1602181900.csv
19.2	hornice_1602190100.csv	hornice_1602190700.csv	hornice_1602191300.csv	hornice_1602191900.csv
20.2	hornice_1602200100.csv	hornice_1602200700.csv	hornice_1602201300.csv	hornice_1602201900.csv
21.2	hornice_1602210100.csv	hornice_1602210700.csv	hornice_1602211300.csv	hornice_1602211900.csv
22.2	hornice_1602220100.csv	hornice_1602220700.csv	hornice_1602221300.csv	hornice_1602221900.csv
23.2	hornice_1602230100.csv	hornice_1602230700.csv	hornice_1602231300.csv	hornice_1602231900.csv
24.2	hornice_1602240100.csv	hornice_1602240700.csv	hornice_1602241300.csv	hornice_1602241900.csv
25.2	hornice_1602250100.csv	hornice_1602250700.csv	hornice_1602251300.csv	hornice_1602251900.csv
26.2	hornice_1602260100.csv	hornice_1602260700.csv	hornice_1602261300.csv	hornice_1602261900.csv
27.2	hornice_1602270100.csv	hornice_1602270700.csv	hornice_1602271300.csv	hornice_1602271900.csv
28.2	hornice_1602280100.csv	hornice_1602280700.csv	hornice_1602281300.csv	hornice_1602281900.csv
29.2	hornice_1602290100.csv	hornice_1602290700.csv	hornice_1602291300.csv	hornice_1602291900.csv

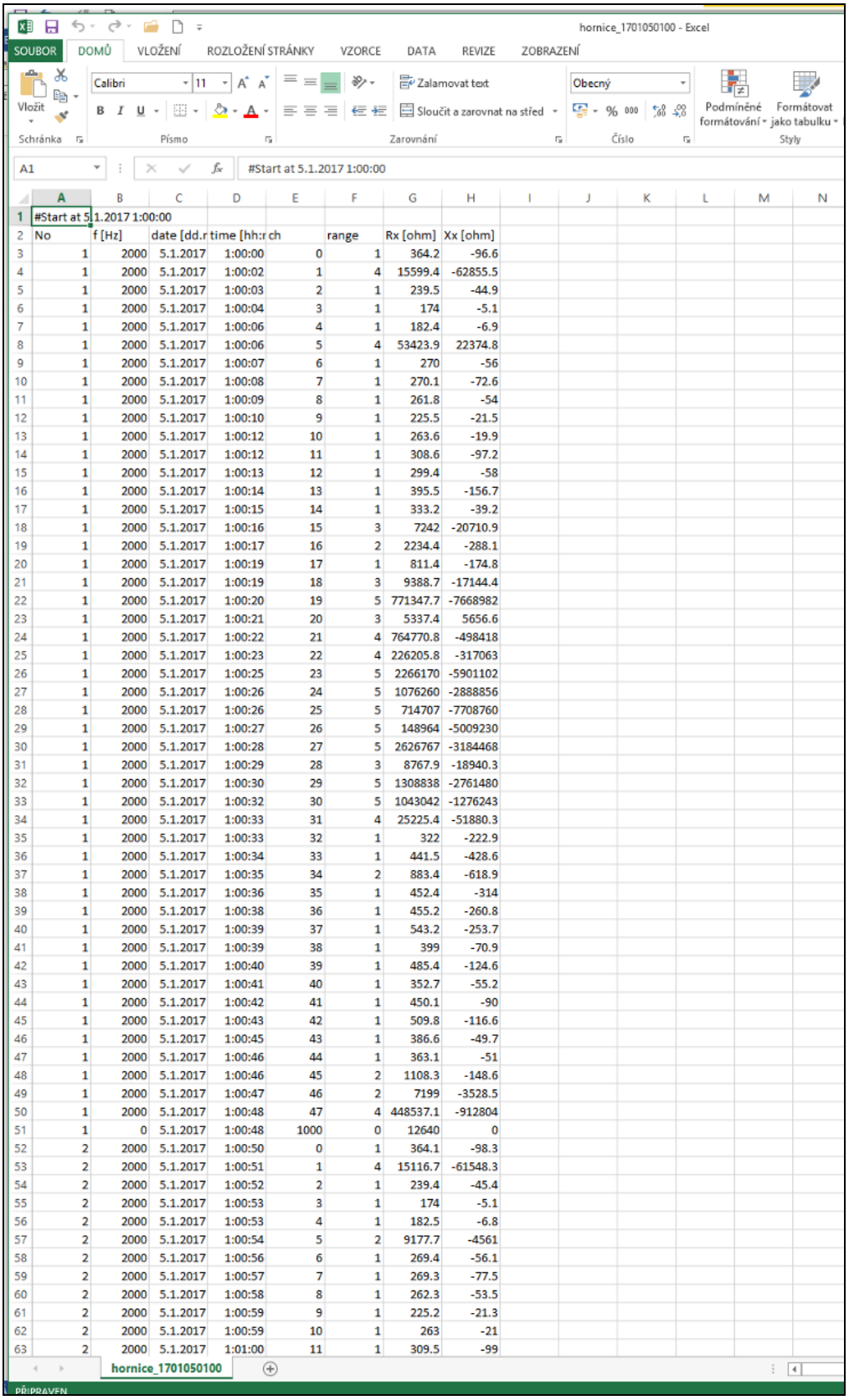
Výpis datových souborů - lokalita HORNICE

V textovém souboru je vždy zaznamenán úvodní řádek s datem a časem měření.

Do tabelárního vyjádření v prostředí programu MS Excel lze převést pořadové číslo měření – No, měřicí frekvenci – f [Hz], datum měření – date [dd.mm.yyyy], hodinu měření – time [hh:mm:ss], měřicí kanál – ch, měřicí rozsah – range, měřenou rezistanci – *Rx* [Ω], měřenou reaktanci – *Xx* [Ω], kdy oddělovacím prvkem záznamu je středník.

```
#Start at 1.6.2016 1:00:00,,,,,,
No,f [Hz],date [dd.mm.yyyy],time [hh:mm:ss],ch,range,Rx [ohm],Xx [ohm]
1,2000,1.6.2016,1:00:00,0,1,306.9,-13.2
1,2000,1.6.2016,1:00:02,1,3,3719.3,-5038.3
1,2000,1.6.2016,1:00:03,2,1,235.4,-7.3
1,2000,1.6.2016,1:00:05,3,1,178.5,-2.8
1,2000,1.6.2016,1:00:05,4,1,172.6,-3
1,2000,1.6.2016,1:00:06,5,2,2716.4,-186
1,2000,1.6.2016,1:00:07,6,1,239.5,-7.2
1,2000,1.6.2016,1:00:08,7,1,243.4,-9.2
1,2000,1.6.2016,1:00:10,8,1,250.8,-8.2
1,2000,1.6.2016,1:00:10,9,1,215.2,-4.7
1,2000,1.6.2016,1:00:11,10,1,246.2,-7.8
1,2000,1.6.2016,1:00:12,11,1,248.8,-7.5
1,2000,1.6.2016,1:00:13,12,1,249.6,-9
1,2000,1.6.2016,1:00:15,13,1,265.4,-9.3
1,2000,1.6.2016,1:00:16,14,1,269,-9.8
1,2000,1.6.2016,1:00:16,15,5,770687,-7696635.5
1,2000,1.6.2016,1:00:17,16,1,481.5,-44.1
1,2000,1.6.2016,1:00:18,17,1,344.9,-18.5
1,2000,1.6.2016,1:00:20,18,1,332,-15.7
1,2000,1.6.2016,1:00:21,19,2,6130.3,1276.9
1,2000,1.6.2016,1:00:22,20,5,1876538,-7712798.7
1,2000,1.6.2016,1:00:22,21,5,10000000,0
1,2000,1.6.2016,1:00:23,22,4,268596,-358738.8
1,2000,1.6.2016,1:00:25,23,5,965513.1,-3887347.8
1,2000,1.6.2016,1:00:26,24,5,715775.3,-7681071.5
1,2000,1.6.2016,1:00:27,25,5,453167.8,-859173.9
1,2000,1.6.2016,1:00:27,26,5,2041866.5,601966.7
1,2000,1.6.2016,1:00:29,27,5,771021,-7682784.2
1,2000,1.6.2016,1:00:30,28,5,771667.2,-7655228.5
1,2000,1.6.2016,1:00:31,29,5,2417827,-4520720.6
1,2000,1.6.2016,1:00:32,30,3,94.1,-7382.2
1,2000,1.6.2016,1:00:33,31,2,2041.5,-422.2
1,2000,1.6.2016,1:00:33,32,1,229,-10.7
1,2000,1.6.2016,1:00:35,33,1,295.7,-23.6
1,2000,1.6.2016,1:00:36,34,1,371.2,-41.5
1,2000,1.6.2016,1:00:37,35,1,307.9,-21.8
1,2000,1.6.2016,1:00:39,36,1,319,-25.2
1,2000,1.6.2016,1:00:39,37,1,342.1,-34.5
1,2000,1.6.2016,1:00:40,38,1,283.1,-19
1,2000,1.6.2016,1:00:41,39,1,323.3,-24.8
1,2000,1.6.2016,1:00:42,40,1,252.8,-16.1
1,2000,1.6.2016,1:00:44,41,1,290,-18.9
1,2000,1.6.2016,1:00:45,42,1,286.8,-19.8
1,2000,1.6.2016,1:00:45,43,1,187.8,-8.5
1,2000,1.6.2016,1:00:46,44,1,205.3,-9.3
1,2000,1.6.2016,1:00:47,45,1,234.2,-17.3
1,2000,1.6.2016,1:00:49,46,1,325.3,-26
1,2000,1.6.2016,1:00:50,47,2,2061.5,-413
1,0,1.6.2016,1:00:50,1000,0,26528,0
2,2000,1.6.2016,1:00:51,0,1,306.7,-13.1
2,2000,1.6.2016,1:00:51,1,4,14777.9,-55552.2
2,2000,1.6.2016,1:00:53,2,1,235.8,-6.5
2,2000,1.6.2016,1:00:54,3,1,178.5,-3.1
2,2000,1.6.2016,1:00:55,4,1,172.2,-2.6
2,2000,1.6.2016,1:00:56,5,2,2926,-309.5
2,2000,1.6.2016,1:00:56,6,1,239.9,-6.3
2,2000,1.6.2016,1:00:58,7,1,243.6,-8.7
2,2000,1.6.2016,1:00:59,8,1,250.7,-8.4
2,2000,1.6.2016,1:01:00,9,1,215.7,-5.9
2,2000,1.6.2016,1:01:01,10,1,246.2,-7.7
2,2000,1.6.2016,1:01:03,11,1,249.9,-8.9
```

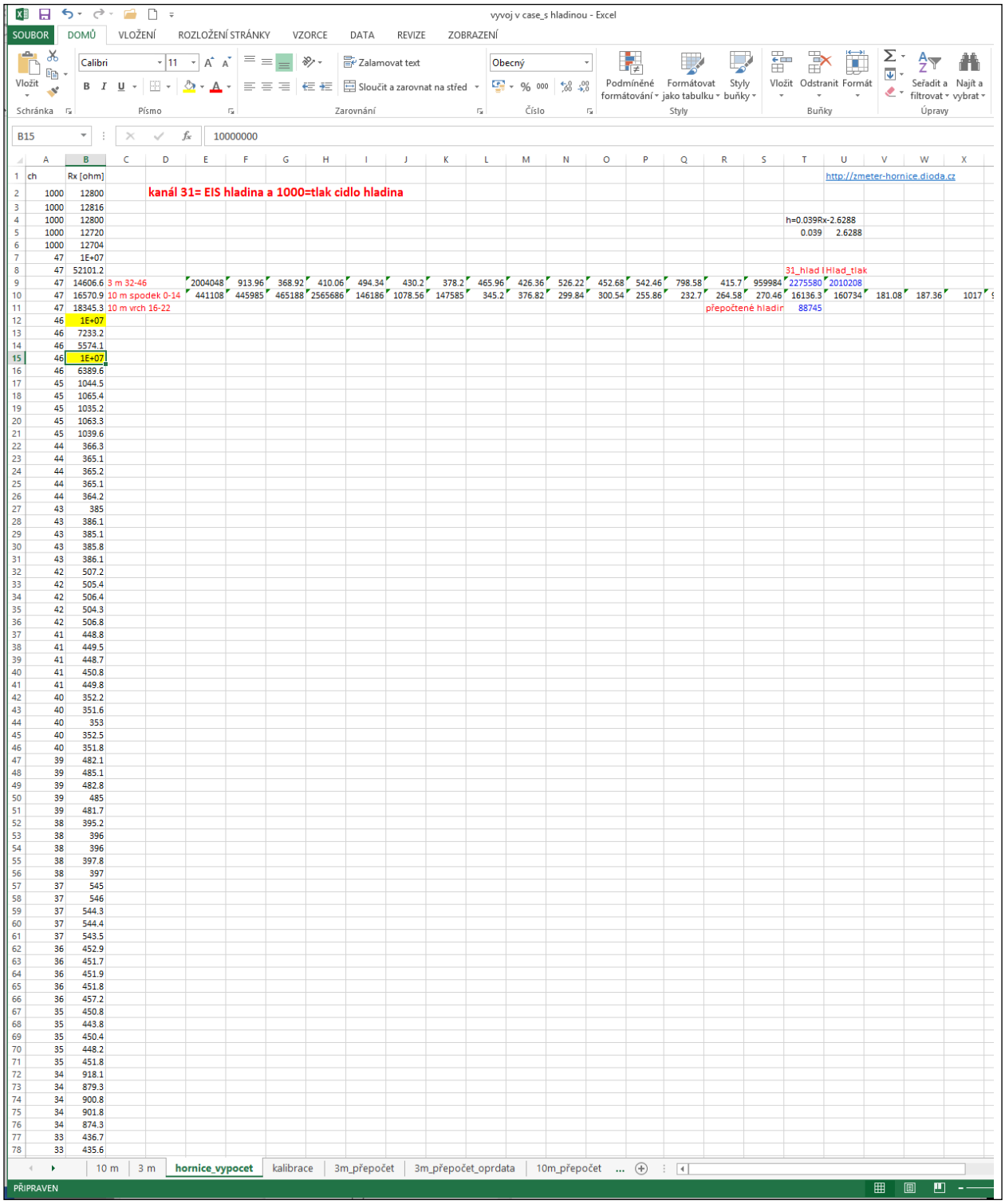
Ukázka dat v programu MS Excel



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	#Start at 5.1.2017 1:00:00							
2	No	f [Hz]	date [dd.r	time [hh:r	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]
3	1	2000	5.1.2017	1:00:00	0	1	364.2	-96.6
4	1	2000	5.1.2017	1:00:02	1	4	15599.4	-62855.5
5	1	2000	5.1.2017	1:00:03	2	1	239.5	-44.9
6	1	2000	5.1.2017	1:00:04	3	1	174	-5.1
7	1	2000	5.1.2017	1:00:06	4	1	182.4	-6.9
8	1	2000	5.1.2017	1:00:06	5	4	53423.9	22374.8
9	1	2000	5.1.2017	1:00:07	6	1	270	-56
10	1	2000	5.1.2017	1:00:08	7	1	270.1	-72.6
11	1	2000	5.1.2017	1:00:09	8	1	261.8	-54
12	1	2000	5.1.2017	1:00:10	9	1	225.5	-21.5
13	1	2000	5.1.2017	1:00:12	10	1	263.6	-19.9
14	1	2000	5.1.2017	1:00:12	11	1	308.6	-97.2
15	1	2000	5.1.2017	1:00:13	12	1	299.4	-58
16	1	2000	5.1.2017	1:00:14	13	1	395.5	-156.7
17	1	2000	5.1.2017	1:00:15	14	1	333.2	-39.2
18	1	2000	5.1.2017	1:00:16	15	3	7242	-20710.9
19	1	2000	5.1.2017	1:00:17	16	2	2234.4	-288.1
20	1	2000	5.1.2017	1:00:19	17	1	811.4	-174.8
21	1	2000	5.1.2017	1:00:19	18	3	9388.7	-17144.4
22	1	2000	5.1.2017	1:00:20	19	5	771347.7	-7668982
23	1	2000	5.1.2017	1:00:21	20	3	5337.4	5656.6
24	1	2000	5.1.2017	1:00:22	21	4	764770.8	-498418
25	1	2000	5.1.2017	1:00:23	22	4	226205.8	-317063
26	1	2000	5.1.2017	1:00:25	23	5	2266170	-5901102
27	1	2000	5.1.2017	1:00:26	24	5	1076260	-2888856
28	1	2000	5.1.2017	1:00:26	25	5	714707	-7708760
29	1	2000	5.1.2017	1:00:27	26	5	148964	-5009230
30	1	2000	5.1.2017	1:00:28	27	5	2626767	-3184468
31	1	2000	5.1.2017	1:00:29	28	3	8767.9	-18940.3
32	1	2000	5.1.2017	1:00:30	29	5	1308838	-2761480
33	1	2000	5.1.2017	1:00:32	30	5	1043042	-1276243
34	1	2000	5.1.2017	1:00:33	31	4	25225.4	-51880.3
35	1	2000	5.1.2017	1:00:33	32	1	322	-222.9
36	1	2000	5.1.2017	1:00:34	33	1	441.5	-428.6
37	1	2000	5.1.2017	1:00:35	34	2	883.4	-618.9
38	1	2000	5.1.2017	1:00:36	35	1	452.4	-314
39	1	2000	5.1.2017	1:00:38	36	1	455.2	-260.8
40	1	2000	5.1.2017	1:00:39	37	1	543.2	-253.7
41	1	2000	5.1.2017	1:00:39	38	1	399	-70.9
42	1	2000	5.1.2017	1:00:40	39	1	485.4	-124.6
43	1	2000	5.1.2017	1:00:41	40	1	352.7	-55.2
44	1	2000	5.1.2017	1:00:42	41	1	450.1	-90
45	1	2000	5.1.2017	1:00:43	42	1	509.8	-116.6
46	1	2000	5.1.2017	1:00:45	43	1	386.6	-49.7
47	1	2000	5.1.2017	1:00:46	44	1	363.1	-51
48	1	2000	5.1.2017	1:00:46	45	2	1108.3	-148.6
49	1	2000	5.1.2017	1:00:47	46	2	7199	-3528.5
50	1	2000	5.1.2017	1:00:48	47	4	448537.1	-912804
51	1	0	5.1.2017	1:00:48	1000	0	12640	0
52	2	2000	5.1.2017	1:00:50	0	1	364.1	-98.3
53	2	2000	5.1.2017	1:00:51	1	4	15116.7	-61548.3
54	2	2000	5.1.2017	1:00:52	2	1	239.4	-45.4
55	2	2000	5.1.2017	1:00:53	3	1	174	-5.1
56	2	2000	5.1.2017	1:00:53	4	1	182.5	-6.8
57	2	2000	5.1.2017	1:00:54	5	2	9177.7	-4561
58	2	2000	5.1.2017	1:00:56	6	1	269.4	-56.1
59	2	2000	5.1.2017	1:00:57	7	1	269.3	-77.5
60	2	2000	5.1.2017	1:00:58	8	1	262.3	-53.5
61	2	2000	5.1.2017	1:00:59	9	1	225.2	-21.3
62	2	2000	5.1.2017	1:00:59	10	1	263	-21
63	2	2000	5.1.2017	1:01:00	11	1	309.5	-99

Ukázka dat v programu MS Excel rozdělených do sloupců

V každé úrovni je vždy měřeno 5 hodnot. Měření jsou seřazena sestupně podle čísla měřicího kanálu, na němž je instalován snímač (vyloučení volných pozicí na konektoru), ze zpracování jsou vyloučena data, která výrazně vybočují z měřeného souboru, ze zbylých hodnot pro každou úroveň je vyjádřen aritmetický průměr a výsledná hodnota je pro příslušný den a čas měření přiřazena určité měřené úrovni. Pro sondu dlouhou 3 m se 16 měřenými úrovněmi v zemině hráze jsou na konektorech obsazeny pozice s čísly „32“ až „46“; pro sondu délky 10 m s 22 měřenými úrovněmi v zemině hráze jsou směrem od koruny hráze do hloubky obsazeny pozice „16“ až „22“ a „0“ až „14“; snímač úrovně hladiny vody v nádrži pracující na principu metody EIS se nachází na pozici „31“ a hydrostatický snímač úrovně hladiny vody v nádrži je na pozici „1000“. Vyloučená data jsou podbarvena žlutou barvou.



Ukázka třídění dat v programu MS Excel

den/hloubka	čas/ kanál	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
		-1.0	-1.3	-1.6	-1.9	-2.2	-2.5	-2.8	-3.1	-3.4	-3.7	-4.0	-4.3	-4.6	-4.9	-5.6	-6.0	-6.6	-7.1	-7.7	-8.2	-8.8	-9.3	-9.9
01.01.2016	1:00:00		30168.1	29805.3	27926.9	29926.6	1071.3	412.3	1248.1	257.5	259.5	232.3	230.0	219.6	204.0	240.8	257.6	249.3	7902.9	155.5	162.9	235.1	6115.6	291.1
	7:00:00		29334.0	29718.7	28098.6	30145.2	1070.7	411.1	1282.3	257.2	259.6	232.7	229.8	219.8	203.2	241.3	258.7	249.1	7844.8	155.6	162.8	234.9	6326.9	289.1
	13:00:00		29321.3	29753.5	28039.4	29885.1	1072.4	411.3	1291.8	259.0	259.6	233.4	230.0	220.4	203.2	241.5	259.9	249.0	6127.8	155.5	163.1	234.7	5478.9	289.0
	19:00:00		29500.5	29949.7	28166.3	29814.9	1081.7	412.7	1298.0	257.5	262.1	233.7	230.8	219.2	204.2	241.6	259.7	251.2	9375.3	155.6	163.2	235.2	4804.0	288.9
02.01.2016	1:00:00		29131.1	29781.3	29642.0	30246.6	1084.3	412.4	1298.3	258.4	260.2	233.8	231.0	220.4	203.8	242.0	260.2	249.9	9038.6	155.9	163.1	235.2	565.2	290.1
	7:00:00		29603.0	30406.3	29574.4	30496.5	1079.1	408.3	1311.0	258.4	260.9	233.6	231.3	220.7	203.9	242.1	260.0	249.5	12180.8	156.0	163.1	235.6	5346.6	290.6
	13:00:00		30055.4	30119.3	29474.4	30492.8	1072.3	414.0	1328.4	258.9	260.7	234.1	231.2	220.6	203.6	242.2	260.3	250.4	6873.5	155.9	163.1	236.0	5901.1	289.5
	19:00:00		30620.3	30280.3	30329.2	30769.5	1076.5	411.5	1324.2	258.7	261.2	232.8	231.0	220.7	203.8	243.2	262.2	251.5	5125.0	155.8	163.2	235.2	5785.3	290.4
03.01.2016	1:00:00		30277.1	30431.5	30794.3	30251.6	1080.3	411.6	1307.3	258.6	260.3	234.7	231.2	220.4	203.5	241.5	259.8	249.9	6978.0	155.9	163.0	235.0	544.6	290.2
	7:00:00		30251.2	30591.1	30999.8	30298.6	1076.5	412.4	1327.6	259.2	261.0	234.2	231.5	220.2	203.6	241.9	259.6	252.3	8307.4	156.0	162.5	234.8	5392.7	290.8
	13:00:00		30735.8	31048.3	31028.1	30486.3	1086.6	410.1	1332.6	258.7	260.0	234.1	231.8	220.6	204.2	241.8	259.4	249.8	6191.5	156.1	163.0	235.3	5826.3	291.1
	19:00:00		30877.3	30941.6	30822.4	30641.2	1087.7	411.7	1330.6	260.5	262.0	234.4	231.7	220.7	204.1	242.4	260.0	249.3	8973.9	156.2	163.2	235.5	6684.6	292.2
04.01.2016	1:00:00		30610.5	30990.4	30984.4	30749.6	1085.5	411.4	1354.1	260.6	261.6	235.1	231.7	220.8	204.0	242.0	259.7	248.7	10365.8	155.9	163.0	235.2	4991.0	291.3
	7:00:00		30785.3	30736.4	31256.1	31362.8	1086.7	410.9	1315.4	261.1	261.6	235.4	232.8	220.5	203.9	242.5	257.8	248.3	9450.8	156.1	162.9	235.0	6473.6	289.7
	13:00:00		30561.1	30750.3	30806.9	30780.0	1094.0	411.6	1218.1	262.5	263.0	236.4	232.3	220.9	204.2	242.4	257.6	244.0	9940.7	156.2	162.8	235.0	5968.2	290.6
	19:00:00		30351.1	30781.8	31069.5	30453.3	1110.3	412.1	1092.5	262.4	264.0	237.0	232.2	221.6	204.0	243.3	257.5	243.1	9135.9	156.2	162.4	235.1	6046.1	291.2
05.01.2016	1:00:00		30338.8	30505.3	30661.3	30335.4	1112.9	410.9	1053.2	264.5	264.1	237.3	232.3	221.4	203.5	243.0	257.4	243.0	11706.0	155.9	163.1	235.7	5453.4	291.5
	7:00:00		30063.1	30042.2	30051.1	29822.6	1114.2	406.8	1019.5	263.2	264.1	237.9	233.4	221.7	204.0	243.1	257.7	243.4	11332.1	156.3	163.1	235.7	5358.7	293.1
	13:00:00		29436.7	28755.3	29529.7	29468.3	1111.5	410.9	1006.7	263.0	264.5	238.0	232.8	221.4	204.3	243.1	258.0	243.5	10411.1	156.9	163.0	235.5	4417.3	291.6
	19:00:00		29174.1	28505.0	29514.2	29194.9	1114.0	410.6	1017.9	263.6	264.8	238.8	231.7	220.6	204.5	243.0	258.1	244.2	6360.9	156.5	163.0	234.4	5780.3	292.7
06.01.2016	1:00:00		29387.2	29012.7	29217.9	29380.7	1116.1	410.4	1024.6	263.6	264.2	238.7	233.1	221.3	204.5	243.3	258.3	244.4	11247.6	156.5	163.0	235.8	5117.4	293.4
	7:00:00		29401.0	29398.6	29143.9	29175.2	1118.8	410.2	1019.7	263.7	264.4	238.5	233.2	221.7	204.8	243.3	257.4	244.7	11372.6	156.5	163.1	236.9	4760.1	294.6
	13:00:00		16936.9	29175.4	29735.8	28956.1	1120.3	409.7	1013.0	264.1	264.3	238.0	232.6	222.1	204.7	246.0	258.1	245.3	7620.6	156.2	163.0	235.9	5783.2	294.4
	19:00:00		27616.8	29353.5	29013.6	28424.4	1119.3	410.8	1013.2	263.9	262.6	238.5	232.9	222.0	204.7	242.7	258.1	243.3	5801.2	156.7	163.0	237.1	6036.4	294.9

Příklad zpracování pro sondu celkové délky 10 m