



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**SLEDOVÁNÍ ŠÍŘENÍ ZNEČISTĚNÍ  
NA FYZIKÁLNÍM MODELU VODNÍHO TOKU**

MONITORING OF THE SPREAD OF POLLUTION ON THE PHYSICAL MODEL  
OF THE WATERCOURSE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

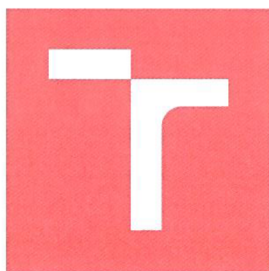
Ondřej Marek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.

**BRNO 2018**



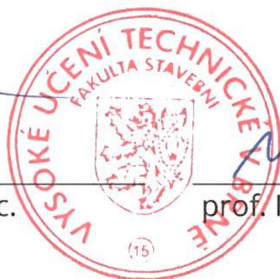
## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ondřej Marek
Název	Sledování šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018
V Brně dne 30. 11. 2017	

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- BLAŽKOVÁ, Š. Šíření havarijního znečištění v tocích. In Vodohospodářské aktuality 2000, sborník z konference, INFO Centrum HL sdružení, Pardubice, listopad 2000.
- BROER, G. J. A. A. Hydrology for the Water Management of Large River Basins. Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991, IAHS Publ. no. 201.
- ČÁBELKA, J., NOVÁK, P. Hydrotechnický výzkum I. Modelový výzkum. SNTL-SVTL, Praha 1964.
- GREEN, H. AND BEVEN, K. Prediction of Times of Travel for a Pollution Incident on the River Eden in March 1993. Technical Report 99, Centre on Environmental Systems and Statistics, Institute of Environmental and Biological Science, Lancaster University, 1994, 178 s.
- KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha 1983.
- PAŘÍLKOVÁ, J., RADKOVSKÝ, K. Manuál Z-metr IV, 2016.
- ŘÍHA, J. et al. Průběh a vyhodnocení testovacích pokusů na řece Svitavě a Svatce. Grantový projekt GA ČR č. 103/99/0456. Závěrečná zprava dílčího výzkumného úkolu. Ústav vodních staveb FAST VUT v Brně, 2001.
- SMITH, P., BEVEN, K., TAWN, J., BLAZKOVA, Š., AND MERTA, L. Discharge-dependent pollutant dispersion in rivers: Estimation of aggregated dead zone parameters with surrogate data. Water Resources Research, Vol. 42, W04412, doi:10.1029/2005WR004008, 2006.
- YOUNG, P.C. AND WALLIS, S.G. Solute transport and dispersion in channels. In Beven, K. and Kirkby, M.J. (eds) Channel Network Hydrology. New York: John Wiley & Sons, USA, 1993.
- ZEHNULA, K. Snímače neelektrických veličin. SNTL, Praha 1983.

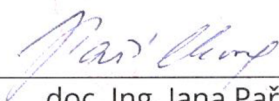
## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

- Rešerše podkladů k problematice šíření znečištění ve vodních tocích.
- Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.
- Koncepce a návrh experimentu pro realizaci měření.
- Realizace a zpracování vybraných měření.
- Dokumentace a vyhodnocení měření.
- Předpokládaný rozsah práce cca 70 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 bakalářské práce



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ondřej Marek
Název	Sledování šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- BLAŽKOVÁ, Š. Šíření havarijního znečištění v tocích. In Vodohospodářské aktuality 2000, sborník z konference, INFO Centrum HL sdružení, Pardubice, listopad 2000.
- BROER, G. J. A. A. Hydrology for the Water Management of Large River Basins. Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991, IAHS Publ. no. 201.
- ČÁBELKA, J., NOVÁK, P. Hydrotechnický výzkum I. Modelový výzkum. SNTL-SVTL, Praha 1964.
- GREEN, H. AND BEVEN, K. Prediction of Times of Travel for a Pollution Incident on the River Eden in March 1993. Technical Report 99, Centre on Environmental Systems and Statistics, Institute of Environmental and Biological Science, Lancaster University, 1994, 178 s.
- KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha 1983.
- PAŘÍLKOVÁ, J., RADKOVSKÝ, K. Manuál Z-metr IV, 2016.
- ŘÍHA, J. et al. Průběh a vyhodnocení testovacích pokusů na řece Svitavě a Svatce. Grantový projekt GA ČR č. 103/99/0456. Závěrečná zprava dílčího výzkumného úkolu. Ústav vodních staveb FAST VUT v Brně, 2001.
- SMITH, P., BEVEN, K., TAWN, J., BLAZKOVA, Š., AND MERTA, L. Discharge-dependent pollutant dispersion in rivers: Estimation of aggregated dead zone parameters with surrogate data. Water Resources Research, Vol. 42, W04412, doi:10.1029/2005WR004008, 2006.
- YOUNG, P.C. AND WALLIS, S.G. Solute transport and dispersion in channels. In Beven, K. and Kirkby, M.J. (eds) Channel Network Hydrology. New York: John Wiley & Sons, USA, 1993.
- ZEHNULA, K. Snímače neelektrických veličin. SNTL, Praha 1983.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

- Rešerše podkladů k problematice šíření znečištění ve vodních tocích.
- Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.
- Koncepce a návrh experimentu pro realizaci měření.
- Realizace a zpracování vybraných měření.
- Dokumentace a vyhodnocení měření.
- Předpokládaný rozsah práce cca 70 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Na vybudovaném fyzikálním modelu vodního toku je v bakalářské práci hledána vhodná látka, která by umožnila simulovat a sledovat šíření znečištění metodou elektrické impedanční spektrometrie. Fyzikální model založený na podobnosti fyzikálních jevů umožnil aplikaci stopovacích látek a měření jejich koncentrace ve zvolených profilech toku při definovaném průtoku. Měření bylo provedeno měřicí aparaturou zhotovenou řešením mezinárodního projektu E!7614 aplikovaného výzkumu v programu EUREKA v rámci jeho udržitelnosti.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

vodní tok, šíření znečištění, fyzikální model, elektrická impedanční spektrometrie

## **ABSTRACT**

On the built physical model of the watercourse, a bachelor's thesis is looking for a suitable substance that would allow simulating and monitoring the pollution transport by the method of electrical impedance spectrometry. Physical model based on the similarity of physical phenomena allowed the application of tracers and measurement of their concentration in selected flow profiles at a defined flow. The measurements were made by measuring apparatus made by the solution of the international project E! 7614 applied research in the EUREKA program as part of its sustainability.

## **KEYWORDS**

watercourse, pollution transport, physical model, electrical impedance spectrometry

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Ondřej Marek *Sledování šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku*. Brno, 2018. 84 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2018

---

Ondřej Marek  
autor práce



## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji své vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za odborné vedení, cenné rady při zpracování bakalářské práce a poskytnutí potřebných podkladů k jejímu vypracování; panu Luboši Pařílkovi za technickou pomoc při realizaci experimentu, Ing. Zuzaně Múnsterové za konzultace při využívání přístroje Z-metr IV a slečně Lucii Suré za pomoc při praktické realizaci práce.

Rovněž děkuji své rodině a nejbližším za podporu a stabilní zázemí jak při studiu, tak i při řešení a zpracování bakalářské práce.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
1.1	Cíl práce.....	14
1.2	Metoda řešení.....	14
<b>2</b>	<b>VODNÍ TOK</b> .....	<b>15</b>
2.1	Rozdělení vodních toků.....	16
<b>3</b>	<b>ZNEČIŠTĚNÍ VODNÍCH TOKŮ</b> .....	<b>17</b>
3.1	ZÁVADNÉ LÁTKY.....	17
3.2	Monitorování jakosti vody.....	18
<b>4</b>	<b>FYZIKÁLNÍ MODEL</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE</b> .....	<b>23</b>
5.1	Princip metody.....	23
<b>6</b>	<b>MĚŘICÍ SYSTÉM</b> .....	<b>25</b>
6.1	Měřicí sondy.....	25
6.2	Přístroj Z-metr IV.....	28
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>31</b>
7.1	Výběr látek simulující znečištění.....	31
7.2	Příprava modelu .....	32
7.3	Kalibrace měřicích sond.....	38
7.4	Měření průběhu šíření znečištění.....	47
<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	<b>57</b>
8.1	První měření.....	57

8.2	Druhé měření.....	59
8.3	Třetí měření .....	60
8.4	Čtvrté měření.....	63
8.5	Páté měření.....	65
8.6	Šesté měření .....	67
8.7	Sedmé měření.....	68
<b>9</b>	<b>MĚŘENÁ KONCENTRACE ZNEČIŠTĚNÍ.....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>77</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK A VELIČIN .....</b>	<b>79</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>80</b>
<b>14</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>82</b>
<b>15</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>84</b>

# 1 ÚVOD

Voda spolu se vzduchem představuje základní podmínky života na Zemi a lidstvo provází od počátku jeho existence. Je velmi důležitou surovinou, látkou zprostředkující transport, stavební látkou těl živých organismů, ceněným zbožím i nástrojem pro relaxování a realizaci volnočasových aktivit a dalších činností. Přírodní zdroje vody lze členit na povrchové a podzemní a jedná se o zdroje vody, které lze využít jako zdroj pitné vody pro obyvatelstvo nebo v technologickém procesu (zavlažování, zásobování apod.). V současné době rozvinutého průmyslu, zemědělství a dalších oborů lidské činnosti včetně výrazných zásahů do přírody dochází ke znehodnocování kvality vody.

Znečištění vody je jedním z nejvýraznějších problémů současného světa a je problémem celosvětovým. Znečištění povrchové vody v tocích a nádržích se promítá zhoršením kvality vodních ekosystémů včetně těch, které se vyskytují v jejich okolí či na ně navazují. Nedostatek kvalitní pitné vody je jednou z hlavních příčin vzniku různých onemocnění, která především v rozvojových zemích mohou mít za následek i úmrtí.

Za hlavní dělení znečištění vody je možné považovat dělení dle zdrojů, tedy znečištění lokální, na němž se mohou podílet domácnosti, podniky, zemědělské chovy a podobně a znečištění plošné, kdy se chování znečišťovatelů může přenášet na další subjekty např. splach hnojiv a pesticidů z polí včetně jejich průniku do podzemních vod.

Dalším klasifikačním faktorem posuzujícím znečištění může být jeho původ. Zde lze v zásadě hovořit o znečištění biologickém, chemickém a fyzikálním. Zatímco biologické znečištění vody způsobují především organické látky (fekálie, silážní kapaliny apod.) a v případě fyzikálního znečištění se jedná především o znečištění radioaktivním zářením (např. při těžbě či ukládání uranu), tepelné znečištění např. při odvádění chladicí vody z elektráren a mechanické znečištění např. zanášení vodních toků či nádrží sedimenty, v případě chemického znečištění se jedná o celý komplex možných příčin jeho vzniku s výrazným nebezpečím možné identifikace až jeho důsledků, protože znečišťující látky nemusí být vždy ve vodě jednoduše pozorovatelné.

Mezi nejzákladnější způsoby chemického znečištění lze zahrnout znečištění ropu a ropnými produkty, kdy látky vytvářejí na hladině vody tenký film zabraňující okysličování vody a poškozující peří ptáků a srst živočichů. Dále se jedná o kategorii látek vyskytujících se především v mycích a čisticích prostředcích, tzv. tenzidů, které jsou povrchově aktivní, zabraňují výměně plynů a jsou jedovaté. Pokud obsahují fosfáty, způsobují eutrofizaci vod. Další velkou skupinu představují polychlorované bifenyly, které jsou součástí hydraulických kapalin, nátěrových hmot a mazadel. Jsou to toxické a karcinogenní látky, které se usazují v tukové tkáni a závažným způsobem poškozují imunitu, nervovou soustavu a kůži. Aktuálním problémem stále zůstávají aplikace hnojiv a pesticidů, ačkoli se jejich užívání omezuje a kontroluje. Z odpadů a imisí se však do vod dostávají těžké kovy, které se kumulují v nádržích, dostávají se do organismů ryb a vodních ptáků a jejich prostřednictvím i člověka. Obdobný fenomén představují látky z léčiv.

Proto je důležité znečištění vody včas odhalit a předpokládat, jak by se mohlo v toku vyvíjet a transportovat. Následně je nutné přijmout taková opatření jejich likvidace, která budou pro daný typ znečištění a danou lokalitu nejvhodnější jak z ekologického, tak ekonomického hlediska. Z uvedeného důvodu je vhodné pro sledování šíření znečištění ve vodním toku či nádrži využít i matematické a fyzikální modelování. Měření na fyzikálním modelu je z časového i ekonomického hlediska náročné, ale pro danou lokalitu může poskytnout komplexní informace včetně návrhu možných opatření a jejich ověření. Je rovněž vhodným přístupem pro kalibraci a verifikaci matematických modelů.

## 1.1 CÍL PRÁCE

Předmětem bakalářské práce s názvem „Sledování šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku“ je ověřit a vyhodnotit vhodnost a použitelnost tří různých látek pro simulaci šíření znečištění na stávajícím fyzikálním modelu úseku řeky Opavy vzhledem k laboratorním podmínkám a detekci koncentrace znečištění metodou elektrické impedanční spektrometrie (EIS).

Měření probíhalo na modelu horní části zátopy vodního díla (VD) Nové Heřminovy, které se bude nacházet na řece Opavě. Fyzikální model vybudovaný v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb sloužil v roce 2015-2016 pro modelový výzkum usazování říčních splavenin v horní části zátopy VD Nové Heřminovy.

## 1.2 METODA ŘEŠENÍ

Určenou metodou detekující znečištění ve vybraných profilech fyzikálního modelu vodního toku byla metoda EIS. Pro měření a záznam naměřených hodnot se využíval modulární systém s přístrojem Z-metr IV, který byl realizovaný řešením mezinárodního projektu E17614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA. Celá měřicí aparatura sestává dále z měřicích sond, vodičů a kalibrátoru.

Pro realizaci své bakalářské práce jsem provedl následující činnosti:

- stručnou rešerši dostupné literatury k problematice znečištění vody a jeho šíření;
- rešerši literatury k problematice proudění dvou kapalin;
- studium metody EIS a realizované aparatury s přístrojem Z-metr IV;
- výběr dostupných látek vhodných pro simulaci šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku;
- kalibraci měřených elektrických veličin vzhledem ke koncentraci látek simulujících znečištění;
- příprava, realizace, zpracování a vyhodnocení experimentu.

## 2 VODNÍ TOK

Podle zákona [§ 43 zákona č. 254/2001 Sb.] jsou vodní toky definovány jako povrchové vody tekoucí vlastním spádem v korytě trvale nebo po převažující část roku, a to včetně vod v nich uměle vzdutých. Jejich součástí jsou i vody ve slepých ramenech a v úsecích přechodně tekoucích přirozenými dutinami pod zemským povrchem nebo zakrytými úseky. Vznik řek a potoků je výsledkem srážko-odtokového procesu v krajině. Voda, která ve formě atmosférických srážek spadne na povrch, stéká působením gravitace po svazích s největším spádem. Nejprve má tento jev podobu neorganizovaného plošného splachu, postupně se však odtok soustřeďuje do drah, jež nabývají podobu erozních rýh či stružek, vytvořených dynamickým účinkem stékající vody na podloží svahu. Voda ze stružek se poté koncentruje ve sníženinách tektonického, erozního, ledovcového, chemického či jiného původu. Postupně tak vznikají koryta vodních toků protékající protáhlé sníženiny – údolí. [1] Počátek vodního toku je označován jako pramen a konec vodního toku jako ústí, což je místo, kde se řeka vlévá do řeky vyššího řádu, jezera nebo moře. Pramenem vodního toku může být vývěr podzemní vody, výtok z ledovců, bažin a močálů nebo soutok dvou a více toků nižšího řádu [1]. Vodní tok může být v celé délce nebo jeho části povrchový nebo podpovrchový, přirozený nebo umělý. Koryto vodního toku je pozemek, který je v katastru nemovitostí evidovaný jako vodní plocha. Protéká-li vodní tok po pozemku, který v katastru nemovitostí není evidován jako vodní plocha, je korytem vodního toku část pozemku zahrnující dno a břehy koryta až po břehovou čáru určenou hladinou vody, která se nevytlívá do přilehlého území [§ 44 zákona č. 254/2001 Sb.]. Rozlišuje se prohloubená a trvale zaplavená část koryta – kyneta, a prostor, který je zaplavený jen při vyšším průtoku – berma. Z uvedeného dále vyplývají i právní důsledky péče o vodní tok. Jedná-li se o přirozené koryto vodního toku, tedy o pozemek, je povinností vlastníka pozemku rovněž péče o koryto vodního toku. Jedná-li se o upravené koryto vodního toku, tedy vodní dílo, je povinností vlastníka vodního díla udržovat vodní dílo v řádném stavu, tj. v povoleném stavu, dodržovat provozní a manipulační řád atd.

## 2.1 ROZDĚLENÍ VODNÍCH TOKŮ

Podle původu se vodní toky dělí na přirozené a umělé. Umělými toky jsou myšleny například průtočné vodní kanály, náhony, meliorační vodoteče, vodní tunely, akvadukty a jiná uměle vytvořená vodní díla.

Mnoho přirozených vodních toků je regulovaných, což znamená, že koryto bylo uměle přebudováno, či jinak upraveno. Důvodem této regulace je například umožnění či zlepšení splavnosti, protipovodňová ochrana, omezení přirozeného rozlivu za účelem využití sousedního území nebo výstavba nádrží. [2]

Podle vytrvalosti vodního toku se rozlišuje [3] stálý vodní tok a občasný vodní tok. Rozdíl mezi těmito pojmy je ten, že na rozdíl od stálého vodního toku, který nijak v období malé vodnosti nevysychá, vodní tok občasný může v daném časovém období plně vyschnout a zpravidla není spojen s podzemními vodami.

Podle velikosti se vodní toky dělí do následujících kategorií:

- bystřina – vodní tok s proměnlivým sklonem dna,
- potok – obecné označení menšího vodního toku s vyrovnanějším a menším sklonem dna,
- řeka – vodní tok o větší délce, rozsáhlejších povodí a větším množství protékající vody,
- veletok – řeky dlouhé nejméně 500 km s povodím minimálně 100 000 km<sup>2</sup>.



### **3 ZNEČIŠTĚNÍ VODNÍCH TOKŮ**

Podle Zákona 20/2004 Sb., o vodách, a Nařízení vlády ČR 61/2003 Sb., které stanoví ukazatele přípustného stupně znečištění vod, je třeba chránit povrchové a podzemní vody před znehodnocením odpadními vodami a závadnými látkami. Odpadní vody a škodlivé látky ohrožují jakost nebo zdravotní nezávadnost vod.

#### **3.1 ZÁVADNÉ LÁTKY**

Závadné látky jsou látky, které při styku s vodou způsobují její kvalitativní znehodnocení, a tím i snížení její užitkové hodnoty. Závadnými látkami se rozumí produkty, suroviny, odpady a přípravky, jejichž složky se mohou dostat do odpadních vod. Za určitých okolností mohou úplně samostatně a nezávisle na použití vody znečišťovat povrchové a podzemní vody. Rozpuštěné látky ve vodě mohou způsobit charakteristické zbarvení. Ne vždy ale toto pravidlo platí a voda může i po znečištění zůstat čirá.

Závadné látky, které se vyskytují samostatně nebo v odpadních vodách, je možno rozdělit podle různých hledisek. Nejčastější je rozdělení podle místa vzniku, zdroje znečištění, povahy látek, vlivu na jakost a zdravotní nezávadnost vod (Hlavínek a Říha, 2004).

Podle místa vzniku lze znečištění dělit na látky produkované:

- obyvatelstvem,
- průmyslem,
- zemědělstvím,
- dopravou,
- jinými složkami.

Podle zdroje znečištění:

- bodové – přímo produkují odpadní vody nebo závadné látky např. výpust kanalizace, únik látek ze skladu chemikálií apod.,
- plošné – neodvádí přímo závadné látky, ale přispívá ke zhoršení jakosti povrchových a podzemních vod. Jsou to rozptýlené zdroje jako např. znečištění zemědělstvím, splachy terénu, exhaláty, skládky atd. (Hlavínek a Říha, 2004).

Podle povahy látek lze znečištění charakterizovat jako:

- fyzikální,
- chemické,
- biologické.

Organické látky obsažené ve vodách mohou být jak přírodního, tak i antropogenního původu. Mezi přírodní organické látky patří například výluhy z půdy nebo sedimentů a produkty činnosti rostlinných a živočišných organismů žijících ve vodě. Antropogenní znečištění je způsobeno převážně splaškovými a průmyslovými odpadními vodami (Hlavínek a Říha, 2004).

Za biologické znečištění považujeme především mikroorganismy, bakterie, zárodky chorob, látky hnilobného rozkladu vody a toxické látky.

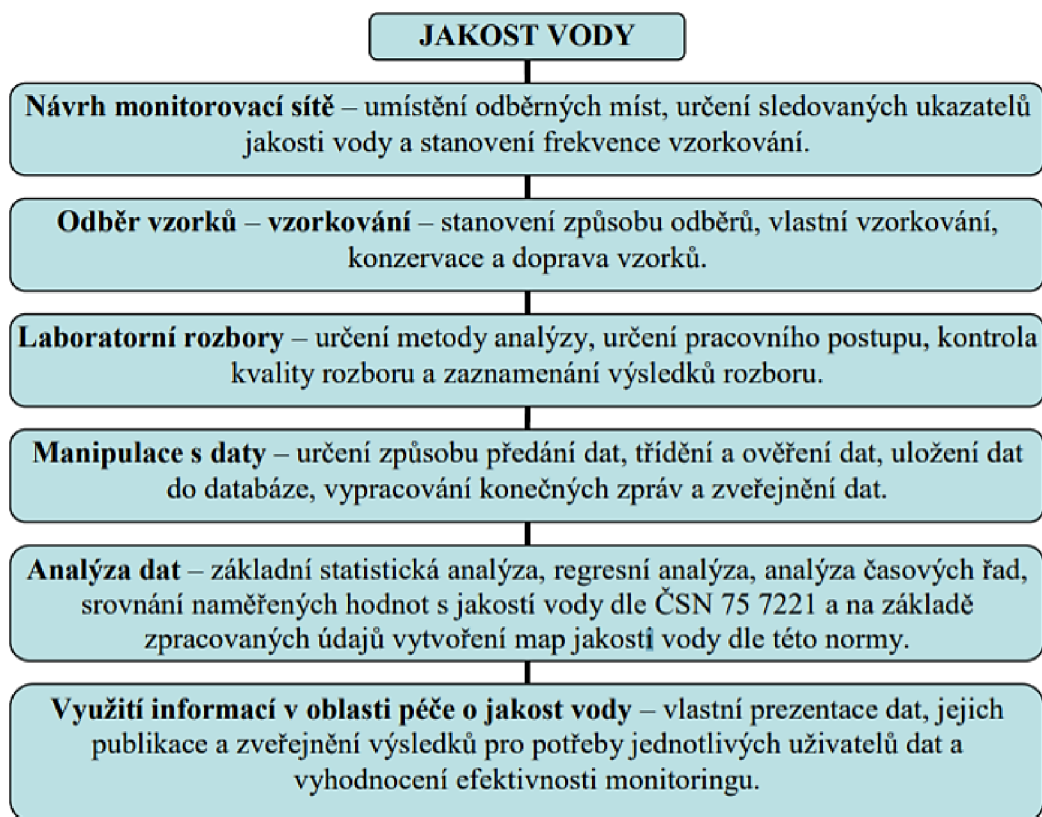
Dále může být znečištění povrchových vod rozdělit na:

- atmosférické,
- komunální,
- průmyslové,
- zemědělské,
- tepelné.

### **3.2 MONITOROVÁNÍ JAKOSTI VODY**

Cílem monitoringu jakosti vody je na základě vzorkování získat kvantitativní informace o fyzikálních, chemických a biologických ukazatelích vody. Monitoring spočívá na různých činnostech, které lze rozdělit do dvou skupin, a to na provozní a informační.

Provozní činnosti zahrnují návrh sítě, určení četnosti vzorkování, výběr sledovaných ukazatelů kvality vody a dále se zabývají samotným vzorkováním a laboratorními rozbory. Informační činnosti představují vyhodnocení výsledků laboratorních rozborů, uložení dat do databáze, prezentaci výsledků. Získané informace se dále využívají například pro různá hlášení, stanovení limitů, povolování vypouštění vod apod. (Hlavínek a Říha, 2004).



*Obr. 3.1- Postup při monitorování jakosti vody (Hlavínek a Říha, 2004)*

Sledované ukazatele stanovené v terénu:

- konduktivita,
- obsah kyslíku,
- pH,
- teplota.

Sledované ukazatele stanovené v laboratoři:

- dusičnany,
- dusitany,
- chloridy,
- sírany,
- celkový fosfor.

Při měření v terénu je možno využít i přístroje umožňující měřit některé z hodnot kvality vody v reálném čase. Na určené monitorovací síti se odebírají do půllitrových nádob vzorky vody. Po vložení sond do vody lze z přístroje odečíst hodnoty pH, konduktivitu a množství rozpuštěného kyslíku. Následně se vzorky co nejdříve převezou do laboratoře a provede se jejich další rozbor.



*Obr. 3.2 – Příklad odběru vzorků vody v praxi [4]*

Pro realizaci experimentální části své bakalářské práce a měření jsem využil stávající fyzikální model zátopové oblasti připravovaného vodního díla Nové Heřminovy a měřicí metodu elektrické impedanční spektrometrie s aparaturou aplikující přístroj Z-metr IV realizovaný řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA.

## 4 FYZIKÁLNÍ MODEL

Pro laboratorní experiment měření šíření znečištění ve vodním toku byl využit fyzikální model horní části zátopy vodního díla (VD) Nové Heřminovy, která se bude nacházet na řece Opavě.



*Obr. 4.1 – Pohled na fyzikální model*

Uvedený fyzikální model byl vybudován v říčním žlabu napojeném na recirkulační oběh vody v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb, na Fakultě stavební. Model je postaven z betonového skeletu s pohyblivým dnem vytvořeným zčásti pískovým a zčásti jemnozrnným kamenivem (Obr. 4.2).

Jak dno, tak břehy vodního toku jsou vymodelovány tak, aby simulovaly drsnosti budoucího upraveného koryta toku. Fyzikální model byl realizován z důvodu sledování transportu sedimentů s možností určení oblastí pro jejich těžbu a následnou transportaci pod hráz budoucí přehrady. Pohyblivé dno bylo důležitou součástí návrhu fyzikálního modelu, stejně jako průběh hladiny vody při sledovaných průtocích.



*Obr. 4.2 – Pohyblivé dno modelu*

Projekt VD Nové Heřminovy je stále v řešení, a předběžný začátek budování je odhadován na rok 2025 [5]. Jedná se o vybudování přehrady (Obr. 4.3) s celkovým objemem 14,61 milionu m<sup>3</sup> společně s dalším souborem protipovodňových opatření fungujících jako jeden celek, a to po toku od obce Nové Heřminovy na Bruntálsku až po město Opava.



*Obr. 4.3 - Vizualizace budoucí přehrady Nové Heřminovy [5]*

## 5 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

### 5.1 PRINCIP METODY

Elektrická impedanční spektrometrie (EIS) je odporová elektromagnetická metoda, která umožňuje [6] studium fyzikálně chemických vlastností anorganických i organických materiálů nedestruktivní cestou. Použitím metody lze analyzovat chemickou čistotu materiálu, obsah vody v pevných nebo sypkých materiálech, zjistit koncentraci nevodivých látek ve vodě nebo elektrolytech, koncentraci iontů v roztocích apod.

Princip metody spočívá v měření frekvenční charakteristiky elektrické impedance testovaného materiálu v komplexním tvaru. Sledována je tedy buď závislost elektrického odporu a reaktance materiálů na kmitočtu napájecího signálu, nebo je provedeno měření elektrické impedance na jednom zvoleném kmitočtu. (Patočka, 2006)

Kmitočtovou charakteristiku elektrické impedance  $Z$  lze vyjádřit jako

$$Z(j\omega) = R + j\omega X, \quad (5.1)$$

kde

$R$  je reálná část elektrické impedance, v ideálním případě představuje kmitočtově nezávislý elektrický odpor [ $\Omega$ ],

$X$  je imaginární část elektrické impedance je kmitočtově závislá reaktance [ $\Omega$ ],

$j$  je imaginární jednotka,

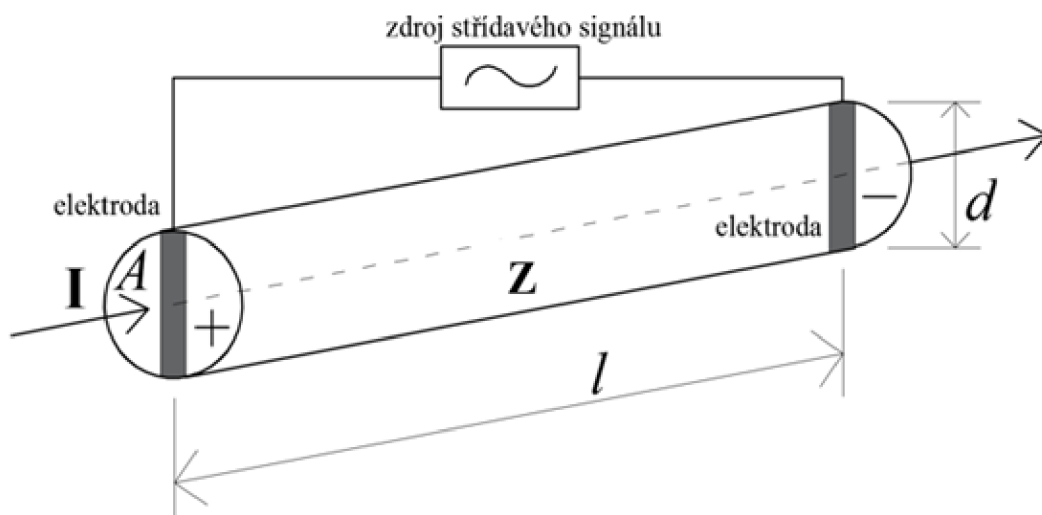
$\omega$  je úhlový kmitočet [rad/s]

Pro úhlový kmitočet platí

$$\omega = 2\pi f, \quad (5.2)$$

kde  $f$  [Hz] je kmitočet budicího střídavého harmonického signálu.

Pro názornější představu (Obr. 5.1) lze elektrickou impedanci považovat za dvojpól obsahující rezistory a akumulční prvky, které popisují zdánlivý elektrický odpor a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence.



Obr. 5.1 – Schéma měření elektrické impedance materiálu

Voda, obsahující určité množství rozpuštěných minerálních solí, se z pohledu elektrotechniky řadí mezi vodiče. Je charakteristická svým elektrickým odporem  $R$  [ $\Omega$ ] resp. elektrickou vodivostí  $G$  [S] vyjádřenou jeho převrácenou hodnotou

$$G = \frac{1}{R}. \quad (5.3)$$



## 6 MĚŘICÍ SYSTÉM

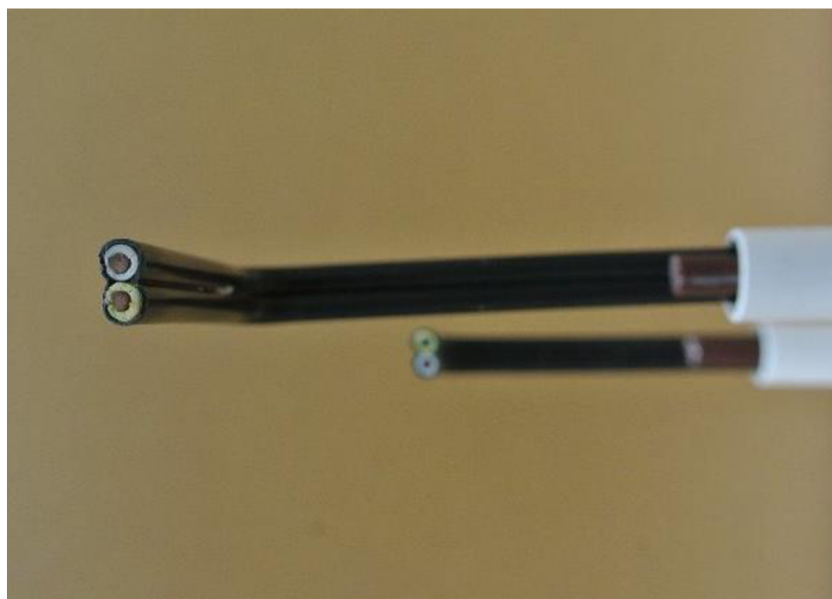
Pro měření simulovaného šíření znečištění ve vodním toku v laboratorních podmínkách byla využita měřicí aparatura sestávající z přístroje Z-metr IV a speciálně konstruovaných pasivních měřicích sond.

### 6.1 MĚŘICÍ SONDY

Od konstrukce měřicích sond bylo očekáváno splnění několika základních specifických požadavků:

- dostatečná tuhost, aby se předešlo případnému kmitání při jejím umístění ve vodním proudu,
- snadná manuální manipulovatelnost se sondami,
- zajištění bodového měření ve stanovených profilech,
- zajištění dobrého kontaktu měřicích elektrod s měřenou kapalinou,
- dostatečný počet sond pro sledování oblastí předpokládaného znečištění,
- jednotná plocha měřicích elektrod pro omezení nejistoty měření elektrické impedance způsobené kontaktem elektrody se sledovanou kapalinou,
- neovlivnění proudění sledované kapaliny umístěním sondy.

Zajištění výše uvedených požadavků vedlo ke konstrukci sondy z ploché dvojlinky reprezentované dvojicí izolovaných měděných vodičů – drátů průměru  $2 \times 2$  mm, izolace kolem každého vodiče má tloušťku 1 mm. Průměr jedné elektrody je tedy 4 mm, průměr sondy je 8 mm a osová vzdálenost měřicích elektrod je 4 mm (Obr. 6.1). Při konstrukci sondy musela být věnována velká pozornost opracování měřicích elektrod, kdy měděný vodič byl kolmo seříznut a izolace zbavena případných otřepů, čímž byla pro všechny sondy zajištěna stejná plocha měřicích elektrod. Dále bylo nutno eliminovat možnost deformace rychlostního pole umístěním sondy do proudící kapaliny. Z uvedeného důvodu byl dvojitý izolovaný měděný drát ve spodní části pravoúhle zalomen. Tímto bylo dosaženo předsazení měřicí části sondy před její vodící část o 5 cm. Vzduť hladiny vody vodící částí sondy tak neovlivnilo proudění vody ani sledovaného simulovaného znečištění vodního toku.



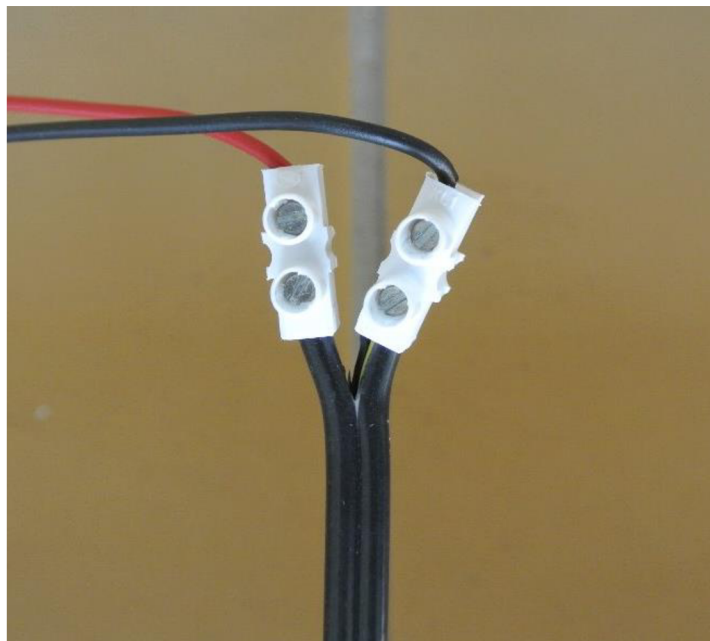
*Obr. 6.1 – Detail měřicí elektrody*

Pro účely detekování šíření znečištění na fyzikálním modelu úseku vodního toku Opava bylo připraveno celkem 15 měřících sond, které byly osazeny ve dvou profilech. Z důvodu pevné fixace a aretace v horizontálním i vertikálním směru byly sondy upevněny ve dvou dřevěných hranolech (Obr. 6.2). V prvním měřené profilu bylo umístěno 7 měřících sond a ve druhém, po směru proudění vzdálenějším profilu, bylo instalováno 8 měřících sond.



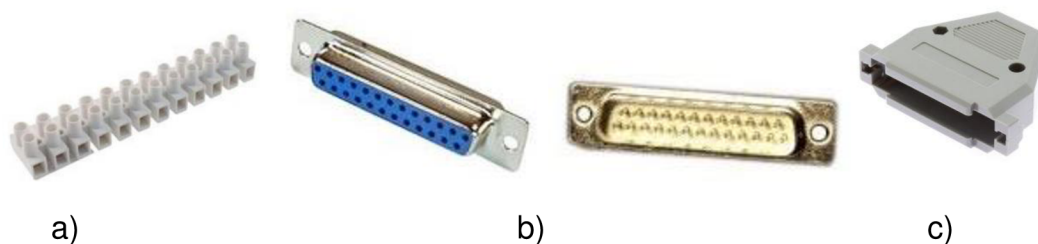
*Obr. 6.2 – Situace měřících elektrod na fyzikálním modelu vodního toku*

Propojení měřicích elektrod s přístrojem Z-metr IV bylo provedeno izolovanými vodiči délky 2 m.



*Obr. 6.3 – Detail propojení vodičů s měřicí elektrodou*

Propojení vodičů s měřicími elektrodami bylo realizováno plastovou elektrikářskou přístrojovou svorkovnicí, propojení s přístrojem Z-metr IV bylo realizováno 25 pinovým konektorem CANON zapouzdřeným v plastové krytce (Obr. 6.4).



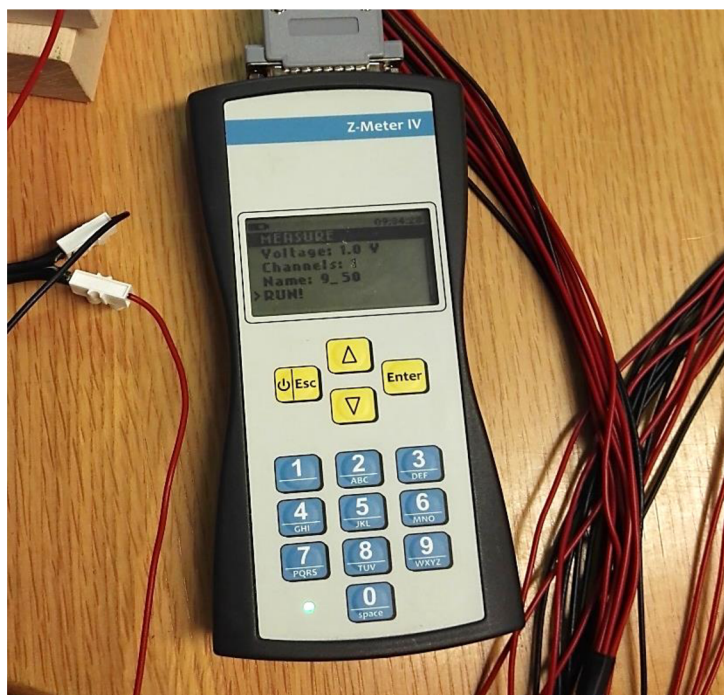
*Obr. 6.4 - Prvky realizace propojení – a) přístrojová svorkovnice, b) konektor CANON, c) krytka konektoru*

## 6.2 PŘÍSTROJ Z-METR IV

Přístroj Z-metr IV (Obr. 6.5) byl navržen a realizován řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA. Jeho aplikace je založena [7] na principu měření elektrické impedance materiálů obsahujících elektricky vodivé ionty. Je součástí měřicí aparatury založené na kontaktním způsobu měření, kterou lze využívat ve stavebnictví, ale také při práci v laboratoři.

Základem přístroje Z-metr IV je 32 bitový výkonný mikroprocesor s jádrem Cortex-M3. Tento mikroprocesor pracuje na frekvenci 120 MHz a má kapacitu 1 MB paměti flash a 128 kB paměti RAM. Přístroj je napájen dvěma dobíjecími akumulátory typu Li-Ion. Jejich kapacita je dostatečná pro 16 hodinový kontinuální provoz. Dobíjení přístroje probíhá prostřednictvím 5V/1A napájecího adaptéru. Uživatelské prostředí zajišťuje LC displej a klávesnice, z níž je možné provádět nastavení přístroje, a to včetně dlouhodobého automatického autonomního provozu.

Naměřená data jsou v textovém formátu ukládána na SD kartu, která není vyměnitelná. K naměřeným datům je přístup umožněn propojením s počítačem pomocí USB kabelu, nebo přes rozhraní Bluetooth. Zpracování dat se zpravidla realizuje v programu MS Excel.



Obr. 6.5 - Přístroj Z-metr IV

Na vrchní části těla Z-metru IV se nachází dva 25 pinové konektory typu CANON, které slouží k připojení měřicích sond. Součástí měřicí sady je kalibrátor (Obr. 6.6 a), který umožňuje kalibraci reálné složky (elektrického odporu) elektrické impedance v rozmezí  $10 \Omega - 1 \text{ M}\Omega$ . Propojení kalibrátoru s přístrojem je rovněž provedeno konektorem typu CANON.

Další součástí přístrojového vybavení je adaptér „one probe“ (Obr. 6.6 b) pro měření na jedné sondě a případně externí přepínač umožňující měření až na max. 256 měřicích kanálech.



a)

b)

***Obr. 6.6 - Příslušenství přístroje Z-metr IV – a) kalibrátor, b) adaptér pro měření na jedné dělené sondě***

Specifikace základních parametrů přístroje Z-metr IV je uvedena v Tab. 6.1 (Pařílková a Radkovský, 2016).

Tab. 6.1 - Specifikace základních parametrů 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

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Cílem mojí bakalářské práce bylo nalézt vhodnou látku pro laboratorní experimenty simulace šíření znečištění na fyzikálních modelech vodních toků či nádrží, z níž by bylo možné připravit vodný roztok, který by respektoval:

- režim proudění vody v toku (otázka spojená především s hustotními a teplotními změnami),
- neovlivňoval měřené hodnoty změnami hodnot pozadí, tj. případným ulpíváním na stěnách modelu či na materiálu dna
- a z dlouhodobého hlediska se nepodílel na destruktivních vlivech působících na recirkulační laboratorní systém, tj. především nebyl příčinou koroze.

Uvedené požadavky bylo nutné ověřit měřeními vzhledem k citlivosti navržené měřicí aparatury pracující s přístrojem Z-metr IV.

### 7.1 VÝBĚR LÁTEK SIMULUJÍCÍ ZNEČIŠTĚNÍ

K simulaci šíření znečištění proudící vodou na fyzikálním modelu úseku vodního toku Opava byly použity a ověřovány následující vodné roztoky:

- Savo original,
- Savo WC gel,
- kuchyňská sůl NaCl.
- Pro vizualizaci proudění byl využit vodný roztok sytě modrého potravinářského barviva dostupného pod obchodním názvem brilantní modř E133.

Jejich výběr byl proveden vzhledem k výše uvedeným požadavkům na experiment. Nemalou měrou se však na jejich volbě podílela fyzická dostupnost a uplatnila i cenová bilance.

## 7.2 PŘÍPRAVA MODELU

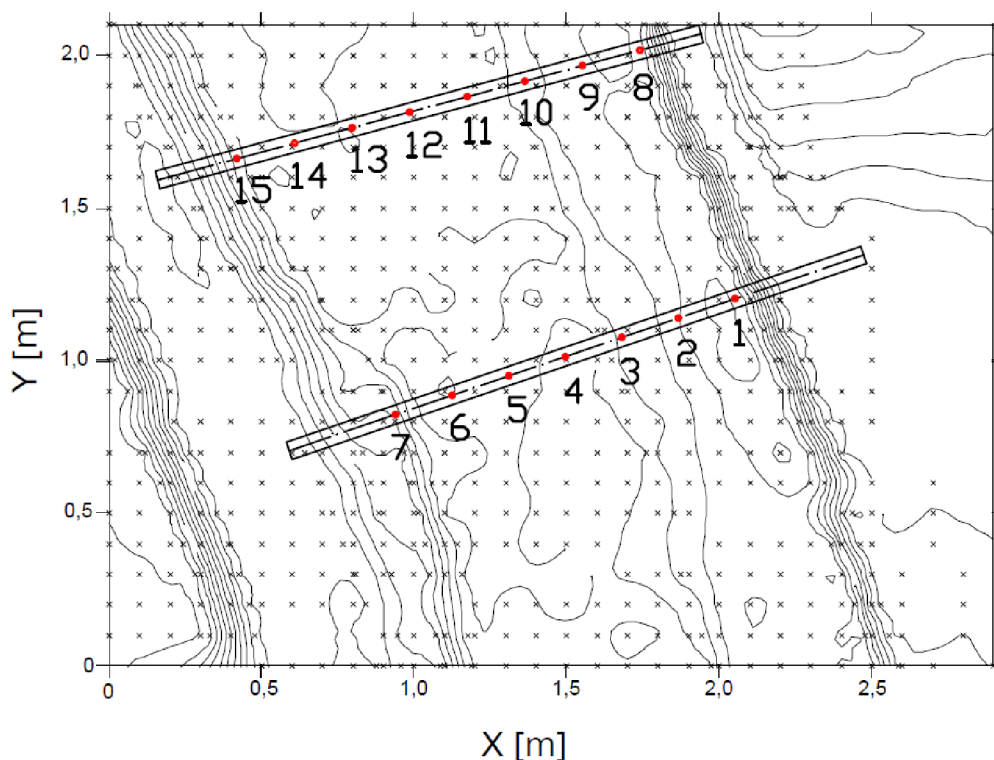
Před zahájením experimentu bylo vždy třeba zajistit jeho opakovatelnost. Bylo nutné definovat parametry, za nichž bude experiment realizován. Pohyblivé dno fyzikálního modelu tvořené pískem definované zrnitostní křivkou bylo vždy vyrovnáno a uvedeno do tzv. nulového stavu, kdy se v kynetě toku eliminovaly všechny výmoly i nánosy vzniklé v důsledku hydrodynamického zatížení modelu. Pro vyrovnání dna bylo použito plastové hladítko.

Po vyrovnání dna modelu, bylo provedeno jeho zaměření hloubkoměrem firmy Mitutoyo (Obr. 7.1). Měřidlo bylo pevně uchyceno na speciální konstrukci, kterou bylo možno připevnit na pojezd vybavený délkovým měřidlem umístěný nad fyzikálním modelem. Tak byl zajištěn horizontální i vertikální pohyb hloubkoměru. Konstrukce pojezdu se pohybuje po kolejnicích upevněných po stranách žlabu a slouží společně s pohyblivou lávkou k přesunu a manipulaci s měřicím zařízením a technikou nad modelem. Zaměření bylo provedeno ve čtvercové síti 0,10 m × 0,10 m (Obr. 7.2). Pro 3D modelaci povrchu dna byl každý bod zaměřen ve třech osách X, Y, Z.



*Obr. 7.1 - Hloubkoměr firmy Mitutoyo*





**Obr. 7.2 – Situace měřících sond koncentrace znečištění a sítě bodů pro měření deformace dna**

Naměřené hodnoty byly následně zpracovány v programu Surfer 8, který slouží k tvorbě trojrozměrných mapových podkladů. Jelikož se práce v tomto programu na naší fakultě nevyučuje, bylo třeba se s jeho funkcemi seznámit. Poté jsem z naměřených hodnot vytvořil následující 3D modely dna, které ukazují na vymílání některých jeho částí při použití vyšších průtoků. Aby bylo dosaženo umístění všech měřících sond pod úroveň hladiny vody v celém měřeném profilu po celou dobu trvání experimentu, bylo nutno nejprve provést zatěžovací zkoušku. Jejím výsledkem byla fixace sond do definovaných hloubkových úrovní a byla ověřena tuhost konstrukce sond, aby nedocházelo k jejich vibračním vlivem proudící vody. Na základě uvedeného experimentu byl zvolen průtok vody na modelu  $Q = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voda byla na model přiváděna z laboratorního recirkulačního systému, v němž je měřena její teplota a úroveň hladiny vody v zásobní nádrži.

Průtok vody na model je stanoven z  $Q/h$  charakteristiky pravoúhlého ostrohranného Thomsonova přelivu a odečítán z LC zobrazovače.

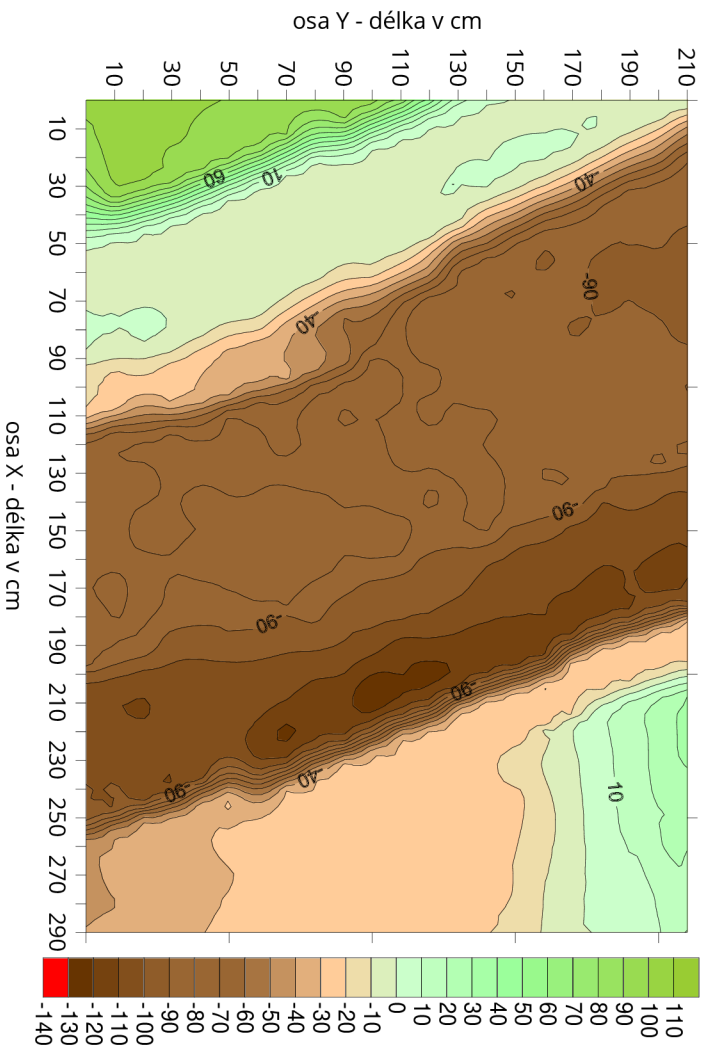
Po každém hydrodynamickém zatížení modelu bylo jeho dno opětovně zaměřeno a byly identifikovány oblasti, v nichž docházelo k vymílání a tvorbě nánosů. V průběhu experimentu byly ve vybraných profilech, totožných s profily měření koncentrace znečištění, rovněž zaměřeny úrovně hladiny proudící vody.



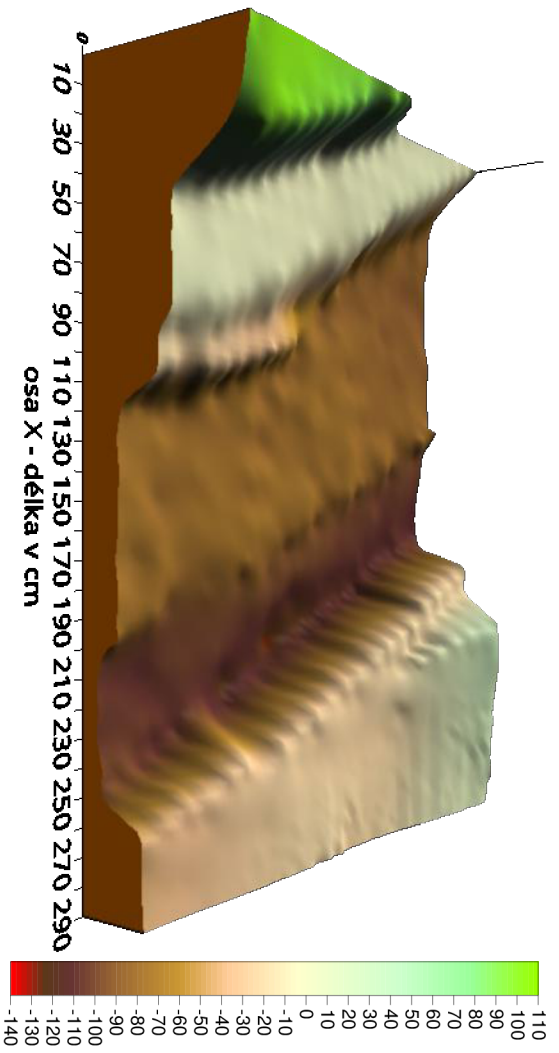
*Obr. 7.3 – Hydrodynamické zatížení dna modelu*



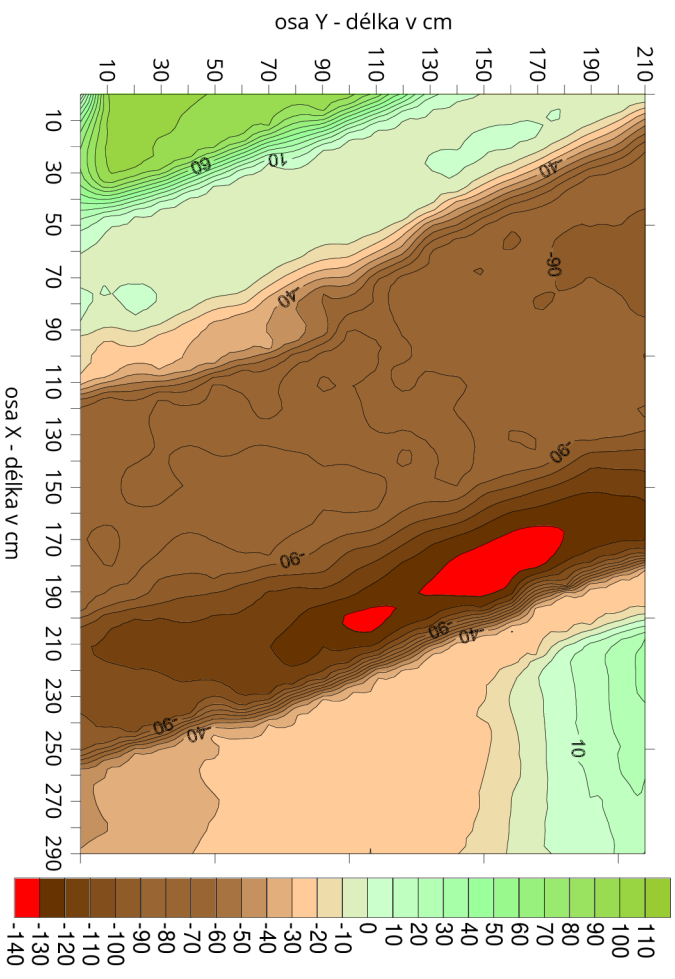
*Obr. 7.4 - Dno fyzikálního modelu po hydrodynamickém zatížení*



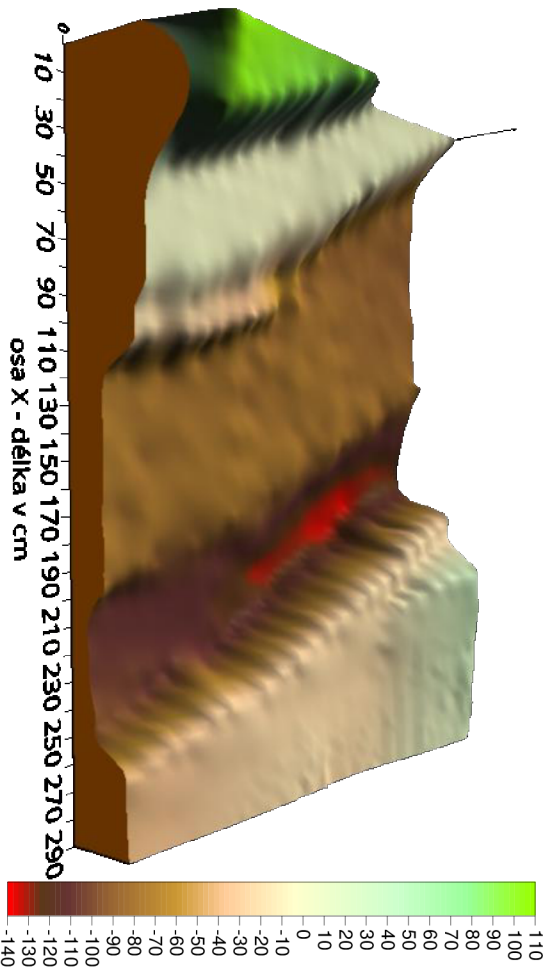
*Obr. 7.3 – Zaměření dna před hydrodynamickým zatžením modelu*



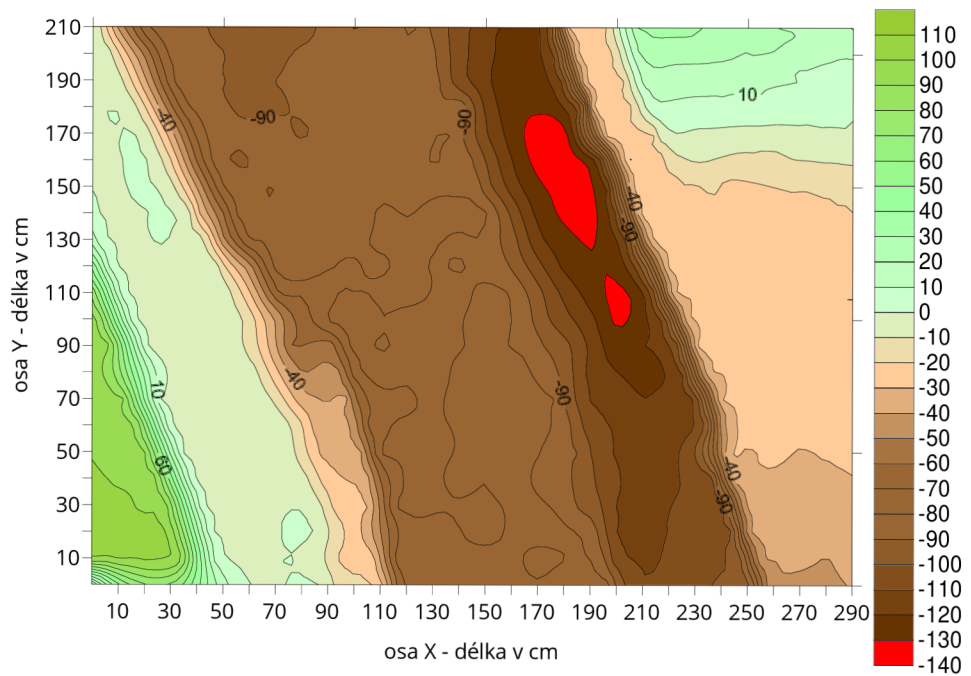
*Obr. 7.4 – 3D model dna před hydrodynamickým zatžením*



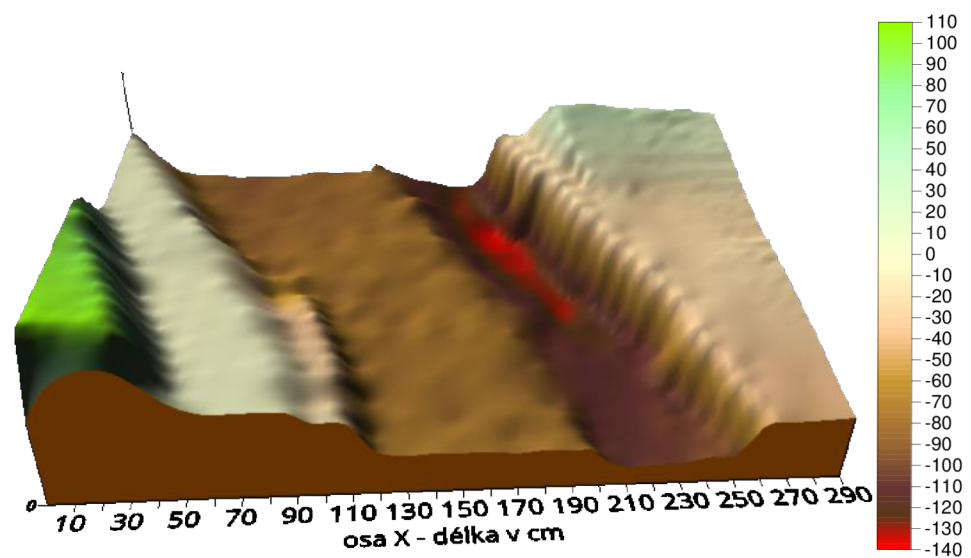
*Obr. 7.5 – Zaměření dna modelu po prvním hydrodynamickém zatížení*



*Obr. 7.6 - 3D model dna po prvním hydrodynamickém zatížení*



**Obr. 7.7 – Zaměření dna modelu po druhém hydrodynamickém zatížení**



**Obr. 7.8 – 3D model dna po druhém hydrodynamickém zatížení**

Z obrázků výše uvedených, které na základě hydraulického zatížení modelu znázorňují velikost deformace dna modelu, je zřejmé, že po druhém měření se dno stabilizovalo a dále nedocházelo k větším deformacím.

### 7.3 KALIBRACE MĚŘICÍCH SOND

Před měřením koncentrace znečištění vodního toku ve stanovených profilech bylo pro jednotlivé měřicí sondy nutné provést kalibraci, kterou byla určena závislost měřené elektrické vodivosti  $G$  na koncentraci  $c$  vodného roztoku dané látky. Tím bylo možné zpětně určit podle měřených hodnot elektrické vodivosti koncentraci znečištění ve stanovených profilech. Pro přípravu kalibračního vodného roztoku jednotlivých látek byla použita destilovaná voda, aby se vyloučila nejistota měření daná vodivostí iontů obsažených v pitné vodě či ve vodě ze zásobní nádrže recirkulačního laboratorního systému. Roztoky byly připravovány a kalibrace byla provedena při teplotě 23°C.

Ke kalibraci bylo využito měřicích plastových nádob, do kterých bylo nalito vždy stejné množství zkoušeného roztoku a postupně byla každá sonda vkládána do roztoku za současného měření obou složek hodnot elektrické impedance přístrojem Z-metr IV (Obr. 7.9). Po každém měření byla sonda očištěna destilovanou vodou a osušena, aby se minimalizovalo stopové množství látek, které by na ní mohly ulpět a následně ovlivnit další kalibrace.



*Obr. 7.9 – Kalibrace měřicích sondy*

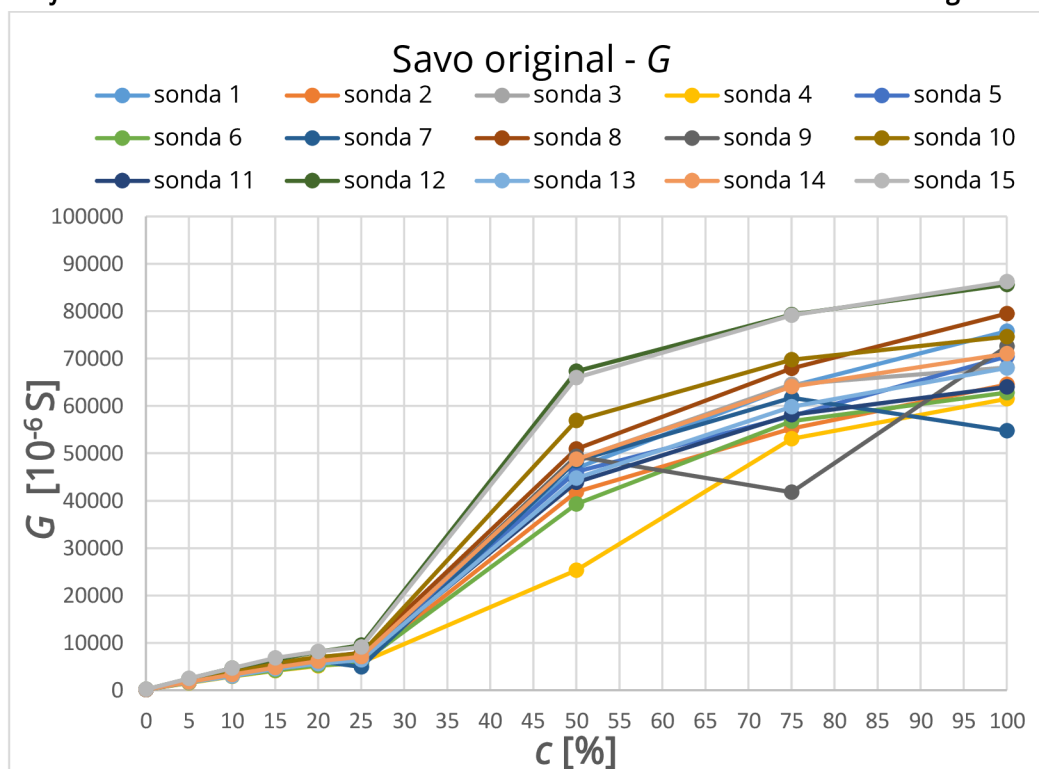
Naměřené hodnoty elektrického odporu  $R$ , které dokumentují změny koncentrace roztoků jednotlivých látek, byly přepočteny na hodnoty elektrické vodivosti  $G$  (Tab.7.1), které lépe dokumentují změny koncentrace  $c$  roztoků jednotlivých látek, neboť na základě dříve provedených experimentů [Patočka] lze očekávat lineární závislost  $c = f(G)$ . Z důvodu vyloučení nejistot přípravy vodných roztoků testovaných látek byla v každém měření hodnota elektrické vodivosti stanovena pro určitou koncentraci  $10\times$  a kalibrační měření byla opakována  $5\times$ , tj.  $5\times$  byly připravovány kalibrační roztoky. Data použitá do kalibračních závislostí byla vyjádřena aritmetickým průměrem měřených hodnot s vyloučením hodnot překračujících odchylku  $\pm 2\%$ . Hodnota uvedené odchylky odpovídá standardní přesnosti měření přístroje Z-metr IV na zvolené frekvenci (Ševčík, EUREKA 2015 a 2016).

Z uvedených průběhů  $G = f(c)$  stanovených pro vodné roztoky látek obsahujících „SAVO“ (Graf 7.1 a Graf 7.2) je zřejmé, že při koncentraci 25% dochází v obou případech a téměř na všech sondách ke zlomu v průběhu charakteristiky. Uvedený jev je obtížné vysvětlit, neboť pracovní postup byl dodržován stále stejný. Nebyl překročen ani rozsah měřicího přístroje Z-metr IV, což dokladují hodnoty stanovené pro vyšší koncentrace roztoků. Hodnoty měřené přístrojem Z-metr IV byly navíc po zjištění uvedené anomálie kontrolovány měřením elektrického odporu kalibrátoru, kde byly pro jednotlivé měřicí rozsahy zaznamenány standardní odchylky (Ševčík, 2016). Od hodnoty koncentrace 50% látek savo ve vodném roztoku a vyšších je trend hodnot elektrické vodivosti  $G$  měřených použitou měřicí technikou opět rostoucí de facto u všech měřicích sond v případě látky Savo original. V případě látky Savo WC gel bylo při její 100% koncentraci všemi sondami zjištěno snížení hodnot  $G$  přibližně o 8%. Na základě uvedených skutečností je možné při zachování citlivosti měřicí aparatury stanovit kalibrační charakteristiky do koncentrace vodných roztoků všech použitých látek, tedy i vodného roztoku kuchyňské soli NaCl, do hranice 25% (Tab. 7.3, Graf 7.3), nebo využít plného rozsahu měřených koncentrací látek s respektováním snížení hodnoty spolehlivosti stanovených závislostí (Tab. 7.4, Graf 7.4 a Tab. 7.5, Graf 7.5).

Tab. 7.1 – Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené  $G \cdot 10^{-6} S$ )

číslo sondy	koncentrace měřeného vodného roztoku Savo original - c [%]								
	100	75	50	25	20	15	10	5	0
1	75758	64185	46860	7022	6627	5159	3634	2012	134
2	64516	55249	41841	5984	5419	4265	3014	1615	112
3	68120	64516	48685	7905	6932	5391	3715	2026	137
4	61501	53079	25342	5867	5097	4076	2886	1508	105
5	70423	57870	46083	6990	6081	4737	3341	1787	114
6	62814	56754	39308	5711	5266	4190	2955	1574	106
7	54765	61728	48403	4902	6122	5138	3608	1898	129
8	79491	67935	50916	7878	6840	5720	4028	2132	137
9	72569	41771	49358	6783	5722	4957	3380	1689	119
10	74627	69735	56948	7783	7017	5750	3993	2077	143
12	64020	58140	43898	6806	5648	4554	3178	1715	112
12	85616	79239	67295	9479	8081	6503	4624	2390	157
13	68027	59809	44763	6435	5583	4528	2991	1657	110
14	71023	64103	48733	7087	6113	4811	3277	1765	116
15	86207	79114	65963	9116	8175	6782	4652	2471	164

Graf 7.1 – Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku Savo original

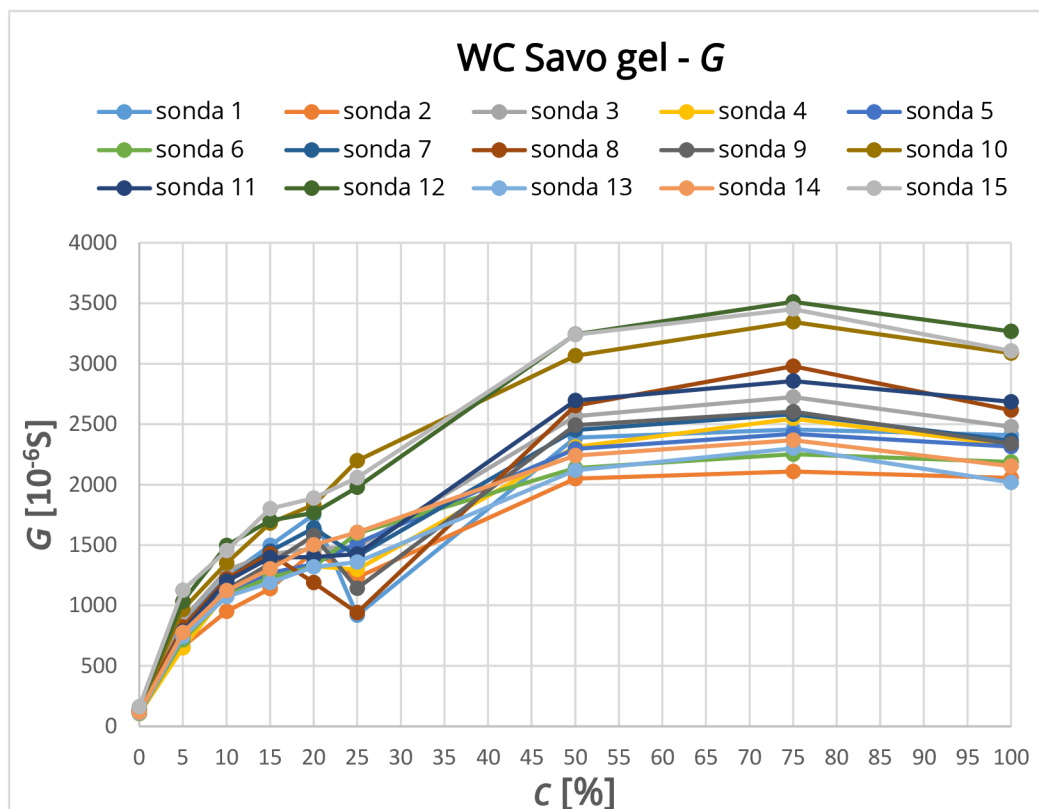




Tab. 7.2 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené  $G \cdot 10^{-6} S$ )

číslo sondy	koncentrace měřeného vodného roztoku Savo WC gel - c [%]								
	100	75	50	25	20	15	10	5	0
1	2409	2455	2388	920	1750	1496	1237	835	134
2	2055	2108	2048	1233	1445	1138	951	660	112
3	2478	2724	2564	1482	1469	1424	1294	881	137
4	2328	2545	2310	1296	1323	1263	1108	650	105
5	2315	2420	2295	1515	1342	1268	1083	746	114
6	2188	2251	2136	1597	1323	1232	1085	715	106
7	2365	2582	2452	1409	1639	1449	1216	742	129
8	2615	2979	2653	940	1188	1426	1220	823	137
9	2338	2603	2491	1141	1578	1347	1134	759	119
10	3086	3344	3065	2197	1832	1683	1352	967	143
12	2685	2856	2694	1425	1400	1395	1201	787	112
12	3265	3511	3243	1979	1766	1701	1496	1032	157
13	2018	2299	2118	1358	1320	1189	1073	741	110
14	2151	2367	2239	1603	1500	1303	1122	776	116
15	3105	3450	3240	2057	1888	1800	1454	1125	164

Graf 7.2 - Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku Savo WC gel

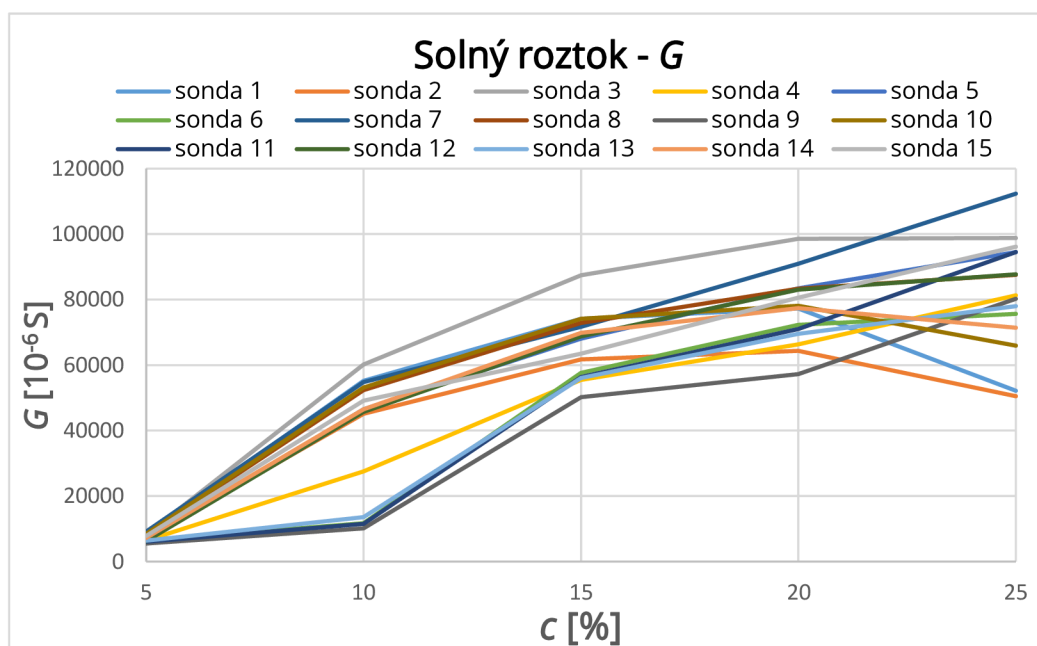


Při řešení bakalářské práce byl využit první přístup, tedy byla respektována hranice 25% koncentrace vodných roztoků použitých látek.

**Tab. 7.3 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené  $G \cdot 10^{-6} S$ )**

číslo sondy	koncentrace měřeného vodného roztoku soli - c [%]				
	25	20	15	10	5
1	52192	77280	74184	55188	8524
2	50505	64350	61728	45126	7176
3	98814	98619	87413	60168	8195
4	81301	66313	55494	27579	6418
5	94518	83472	68120	46468	6400
6	75643	72254	57670	11712	6504
7	112360	90909	71736	54825	9161
8	87566	83333	72886	52356	8130
9	80257	57274	50251	10099	5505
10	65963	78125	74184	53135	8455
11	94518	71023	56370	11515	6053
12	87719	83056	68776	45704	6253
13	78003	69541	56054	13557	6384
14	71429	77399	69832	46512	7233
15	96154	80645	63452	49164	7828

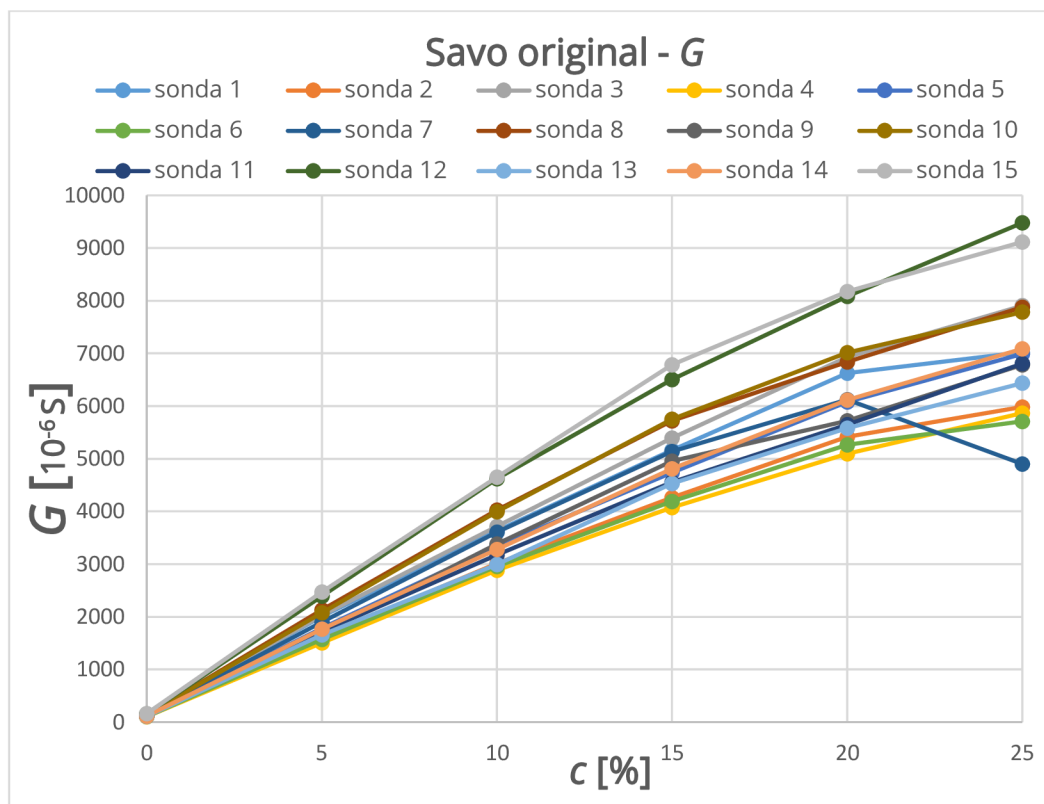
**Graf 7.3 – Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku kuchyňské soli NaCl do 25%**



Tab. 7.4 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené  $G \cdot 10^{-6} S$ )

číslo sondy	koncentrace měřeného vodného roztoku Savo original - c [%]					
	25	20	15	10	5	0
1	7022	6627	5159	3634	2012	134
2	5984	5419	4265	3014	1615	112
3	7905	6932	5391	3715	2026	137
4	5867	5097	4076	2886	1508	105
5	6990	6081	4737	3341	1787	114
6	5711	5266	4190	2955	1574	106
7	4902	6122	5138	3608	1898	129
8	7878	6840	5720	4028	2132	137
9	6783	5722	4957	3380	1689	119
10	7783	7017	5750	3993	2077	143
11	6806	5648	4554	3178	1715	112
12	9479	8081	6503	4624	2390	157
13	6435	5583	4528	2991	1657	110
14	7087	6113	4811	3277	1765	116
15	9116	8175	6782	4652	2471	164

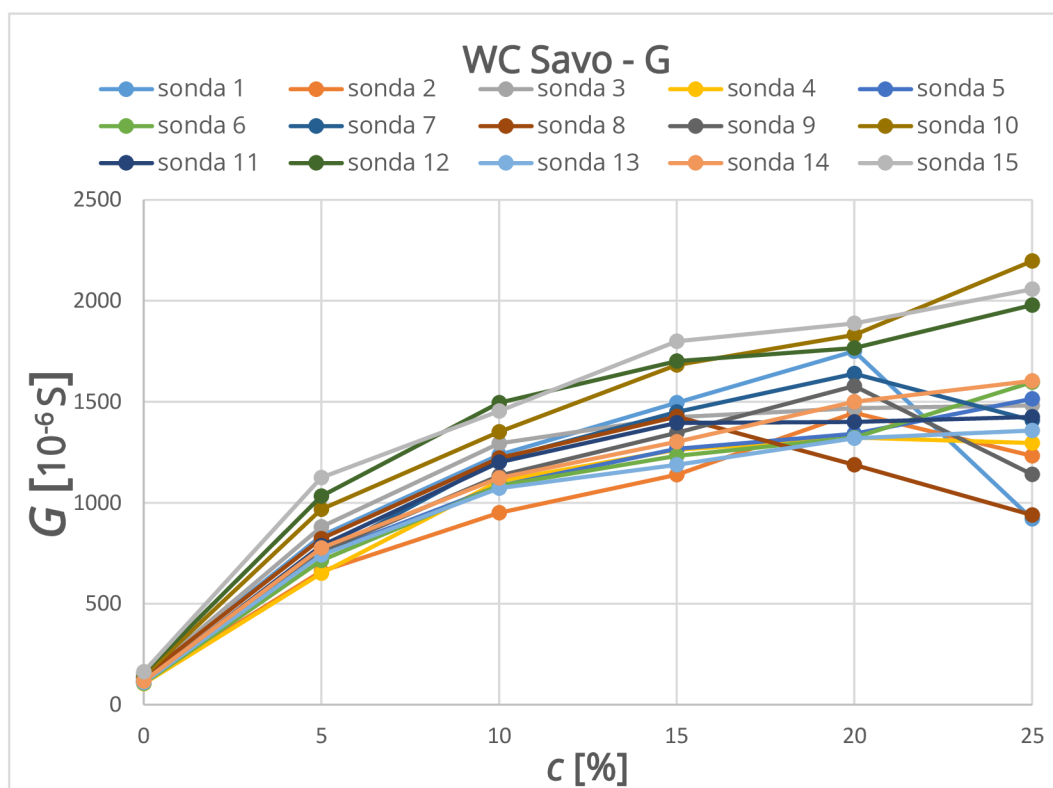
Graf 7.4 - Závislost elektrické vodivosti  $G$  na koncentraci vodného roztoku Savo original do 25%



Tab. 7.5 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřen $\acute{e}$   $G \cdot 10^{-6} S$ )

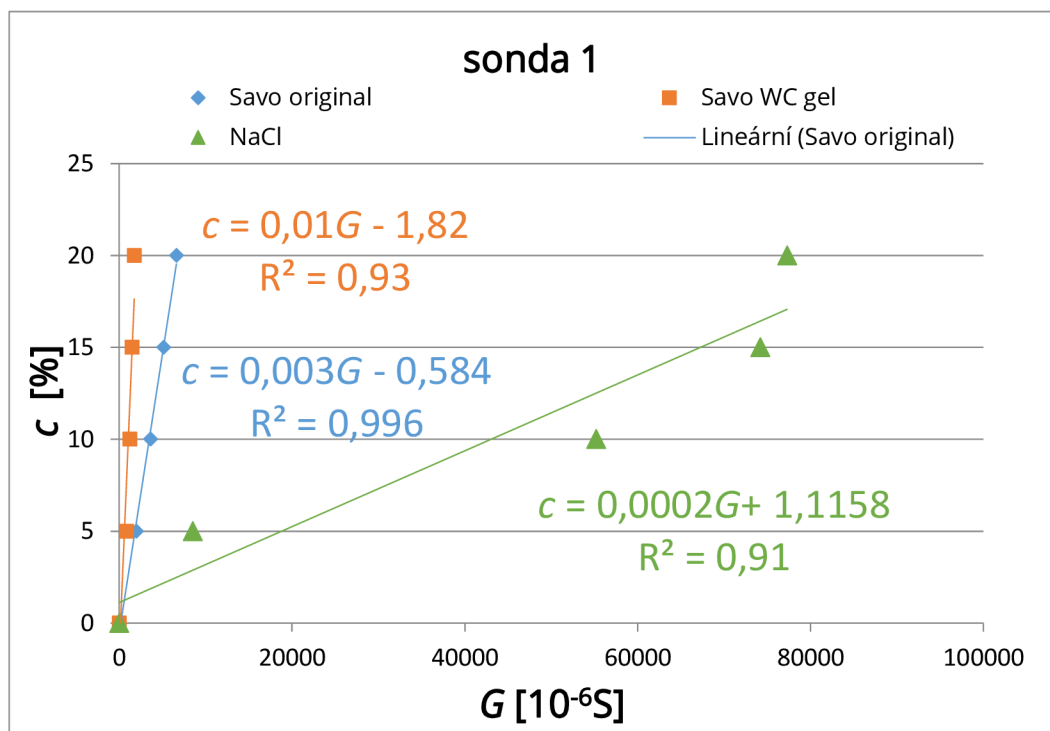
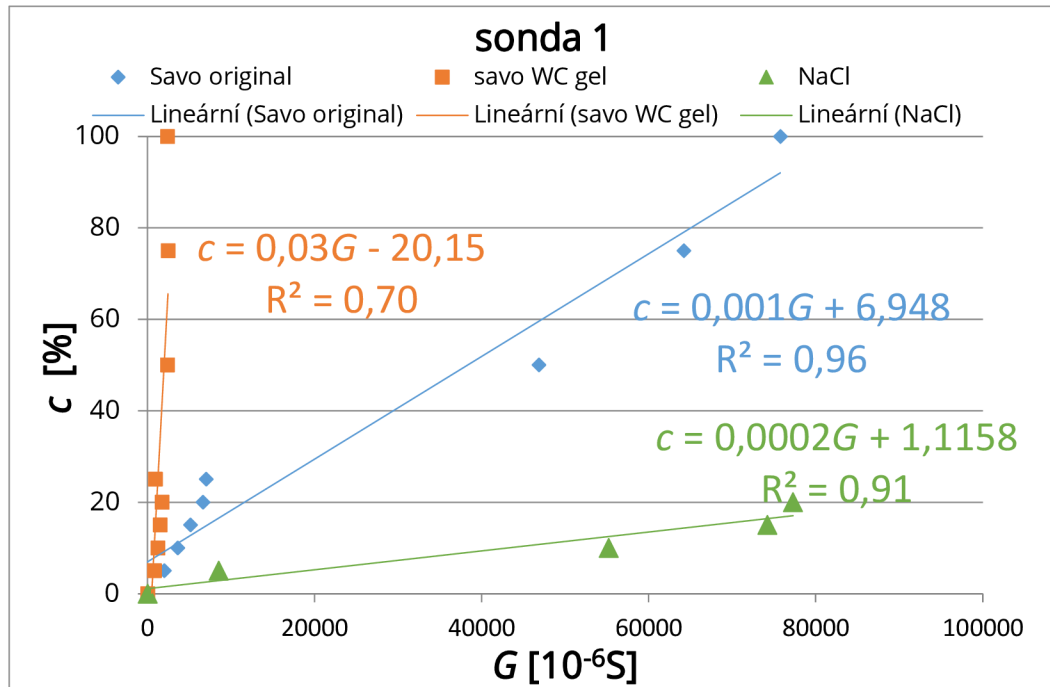
číslo sondy	koncentrace měřeného roztoku Savo WC gel - c [%]					
	25	20	15	10	5	0
1	920	1750	1496	1237	835	134
2	1233	1445	1138	951	660	112
3	1482	1469	1424	1294	881	137
4	1296	1323	1263	1108	650	105
5	1515	1342	1268	1083	746	114
6	1597	1323	1232	1085	715	106
7	1409	1639	1449	1216	742	129
8	940	1188	1426	1220	823	137
9	1141	1578	1347	1134	759	119
10	2197	1832	1683	1352	967	143
11	1425	1400	1395	1201	787	112
12	1979	1766	1701	1496	1032	157
13	1358	1320	1189	1073	741	110
14	1603	1500	1303	1122	776	116
15	2057	1888	1800	1454	1125	164

Graf 7.5 - Závislost elektrické vodivosti  $G$  na koncentraci vodného roztoku Savo WC gel do 25%



Příklad stanovených kalibračních křivek vodných roztoků jednotlivých zkoumaných látek s dokumentováním změny hodnoty jejich spolehlivosti je graficky znázorněn pro sondu č. 1 (Graf 7.6). Zjištěné kalibrační vztahy jsou dále uvedeny v Tab. 7.6 pro koncentrace vodných roztoků látek Savo do 100% a Tab 7.7 pro koncentrace vodných roztoků látek Savo do 5% s dokumentací spolehlivosti jednotlivých stanovení.

Graf 7.6 – Kalibrační závislost měřicí sondy č. 1



**Tab. 7.6 – Kalibrační vztahy pro vodné roztoky koncentrace do 100%**

číslo sondy	Savo		Savo WC gel	
	c	R <sup>2</sup>	c	R <sup>2</sup>
1	$c = 0,0011 \cdot G + 6,9734$	0,96	$c = 0,0337 \cdot G - 17,208$	0,68
2	$c = 0,0013 \cdot G + 7,1151$	0,95	$c = 0,0413 \cdot G - 20,131$	0,73
3	$c = 0,0012 \cdot G + 6,4939$	0,94	$c = 0,0336 \cdot G - 20,132$	0,74
4	$c = 0,0014 \cdot G + 8,0682$	0,97	$c = 0,0362 \cdot G - 18,191$	0,78
5	$c = 0,0012 \cdot G + 6,8674$	0,96	$c = 0,0373 \cdot G - 20,433$	0,76
6	$c = 0,0013 \cdot G + 7,2968$	0,95	$c = 0,0396 \cdot G - 21,292$	0,73
7	$c = 0,0012 \cdot G + 7,6596$	0,87	$c = 0,0342 \cdot G - 19,315$	0,71
8	$c = 0,0011 \cdot G + 6,8039$	0,96	$c = 0,0303 \cdot G - 13,307$	0,77
9	$c = 0,0012 \cdot G + 7,7893$	0,92	$c = 0,0338 \cdot G - 16,99$	0,72
10	$c = 0,0010 \cdot G + 6,9146$	0,92	$c = 0,0270 \cdot G - 19,322$	0,75
11	$c = 0,0013 \cdot G + 6,8794$	0,95	$c = 0,0318 \cdot G - 17,644$	0,79
12	$c = 0,0009 \cdot G + 6,8671$	0,92	$c = 0,0263 \cdot G - 19,162$	0,78
13	$c = 0,0012 \cdot G + 7,2245$	0,95	$c = 0,0399 \cdot G - 20,362$	0,71
14	$c = 0,0011 \cdot G + 7,1198$	0,94	$c = 0,0373 \cdot G - 20,760$	0,68
15	$c = 0,0009 \cdot G + 6,7949$	0,93	$c = 0,0264 \cdot G - 19,851$	0,73

**Tab. 7.7 – Kalibrační vztahy pro všechny roztoky koncentrace do 25%**

číslo sondy	Savo 25%		Savo WC gel do 25%		NaCl do 25%	
	c	R <sup>2</sup>	c	R <sup>2</sup>	c	R <sup>2</sup>
1	$c = 0,003 \cdot G - 1,242$	0,97	$c = 0,010 \cdot G + 2,034$	0,44	$c = 0,0002 \cdot G + 2,476$	0,63
2	$c = 0,004 \cdot G - 1,144$	0,98	$c = 0,016 \cdot G - 2,250$	0,81	$c = 0,0003 \cdot G + 1,609$	0,72
3	$c = 0,003 \cdot G - 0,913$	0,99	$c = 0,014 \cdot G - 2,595$	0,74	$c = 0,0002 \cdot G + 0,865$	0,90
4	$c = 0,004 \cdot G - 1,053$	0,99	$c = 0,016 \cdot G - 2,309$	0,78	$c = 0,0003 \cdot G + 1,507$	0,98
5	$c = 0,004 \cdot G - 0,958$	0,99	$c = 0,016 \cdot G - 3,031$	0,85	$c = 0,0002 \cdot G + 0,978$	0,96
6	$c = 0,004 \cdot G - 1,214$	0,98	$c = 0,016 \cdot G - 2,906$	0,88	$c = 0,0003 \cdot G + 3,003$	0,90
7	$c = 0,004 \cdot G - 0,801$	0,82	$c = 0,013 \cdot G - 1,948$	0,77	$c = 0,0002 \cdot G + 0,830$	0,97
8	$c = 0,003 \cdot G - 1,272$	0,98	$c = 0,012 \cdot G - 1,514$	0,40	$c = 0,0002 \cdot G + 0,624$	0,92
9	$c = 0,004 \cdot G - 1,042$	0,98	$c = 0,014 \cdot G - 0,912$	0,65	$c = 0,0003 \cdot G + 3,280$	0,93
10	$c = 0,003 \cdot G - 1,169$	0,98	$c = 0,012 \cdot G - 2,869$	0,91	$c = 0,0002 \cdot G + 1,242$	0,77
11	$c = 0,004 \cdot G - 0,937$	0,99	$c = 0,015 \cdot G - 2,540$	0,76	$c = 0,0002 \cdot G + 3,348$	0,93
12	$c = 0,003 \cdot G - 1,013$	0,99	$c = 0,012 \cdot G - 3,017$	0,82	$c = 0,0002 \cdot G + 0,966$	0,94
13	$c = 0,004 \cdot G - 0,932$	0,99	$c = 0,016 \cdot G - 2,979$	0,81	$c = 0,0003 \cdot G + 2,778$	0,93
14	$c = 0,004 \cdot G - 0,837$	0,99	$c = 0,015 \cdot G - 3,017$	0,88	$c = 0,0003 \cdot G + 0,970$	0,86
15	$c = 0,003 \cdot G - 1,205$	0,98	$c = 0,011 \cdot G - 3,128$	0,83	$c = 0,0002 \cdot G + 0,762$	0,97

## 7.4 MĚŘENÍ PRŮBĚHU ŠÍŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ

Výsledek realizovaného experimentu byl rovněž výrazně závislý na způsobu a místě dávkování vodného roztoku látek simulujících znečištění při jejich zvolené koncentraci. Vzhledem k jednoznačnosti určení pozice a opakovatelnosti experimentu v jeho třech variantách byl vodný roztok látek simulujících znečištění vodního toku dávkován do středu koryta na počátku fyzikálního modelu. Jeho odpovídající objem 0,005 m<sup>3</sup> byl připraven do plastového barelu o objemu 0,015 m<sup>3</sup>. Barel byl opatřen [8] výpustným kohoutkem, který umožňoval regulaci průtoku odtékajícího roztoku a jeho stabilizace v místě dávkování proti posunu a případnému stržení proudem vody (Obr. 7.10) byla zabezpečena pomocí několika cihel. Dávkovací výpustný kohoutek byl umístěn těsně nad hladinu.



*Obr. 7.10 – Umístění barelu na modelu*

Po prvním měření bylo zjištěno, že umístění barelu není vhodné, neboť roztok dávkovaný do hladiny byl pouze částečně unášen proudem protékající vody. Proto byla na výpustný kohoutek připevněna plastová hadička (Obr. 7.11), která umožnila dávkování roztoku pod hladinu proudící vody a tím i jeho transport modelem.

Z důvodu zajištění konstantního vytékání roztoku z barelu byla změněna i jeho poloha fixace na místě dávkování.



*Obr. 7.11 – Umístění barelu s plastovou hadičkou na kohoutu*

Na ovládacím panelu přístroje, který sloužil k obsluze čerpadel měrného žlabu, byla před každým měřením odečtena teplota v místnosti a teplota vody v čerpací jímce. Po spuštění čerpadel se muselo několik minut počkat, aby se zajistilo vyrovnaní průtoku vody modelem. Následně byly nastaveny parametry přístroje Z-metr IV a bylo zahájeno měření.

Pro zajištění současného dávkování roztoku simulujícího znečištění a měření jeho šíření fyzikálním modelem vodního toku bylo třeba součinnosti dvou osob. Při dávkování vodného roztoku látek simulujících znečištění bylo respektován kontinuální nerovnoměrný průtok.

Na základě výsledků testovacích měření byl průtok vody modelem stanoven na hodnotu  $0,013 \text{ m}^3/\text{s}$ , aby bylo zajištěno ponoření měřících sond.

Při každé z variant experimentu byly dále v profilech a úrovních umístění sond měřících koncentraci simulovaného znečištění měřeny bodové rychlosti přístrojem THERM 2285-2 (Obr. 7.12), průběh hladiny a po ukončení experimentu byla kontrolována úroveň dna modelu.

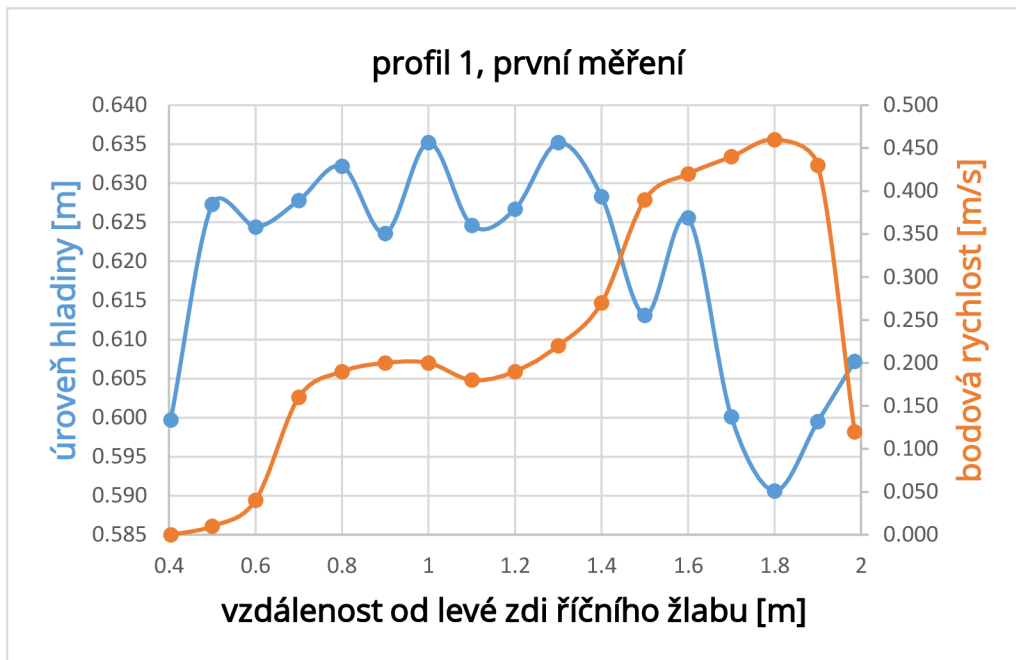




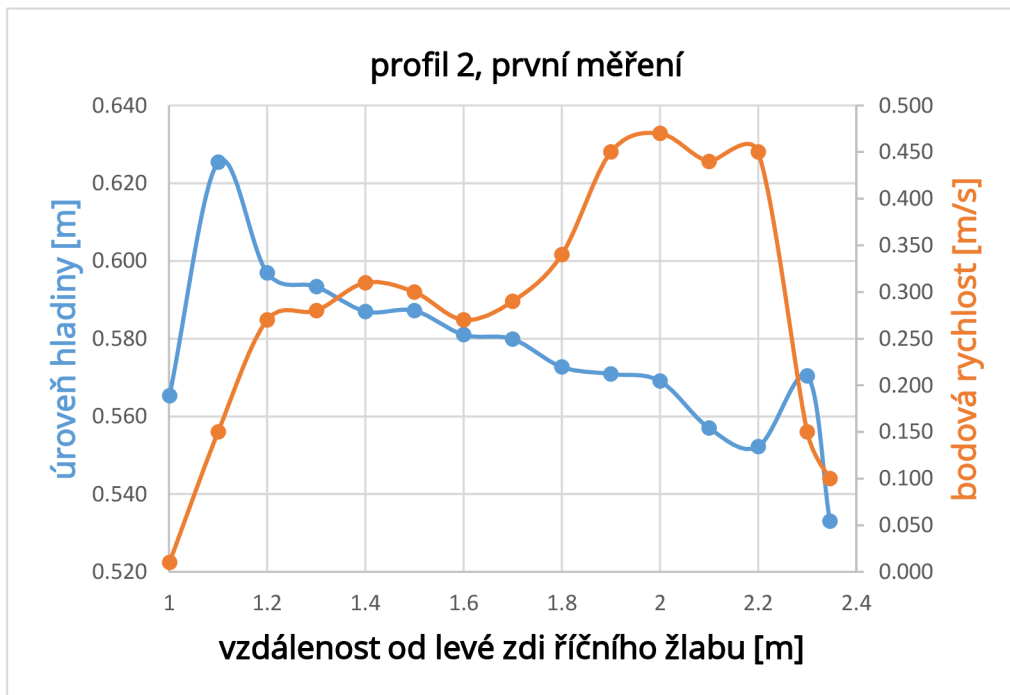
**Obr. 7.12 – Měřicí přístroj THERM 2285-2**

Výsledky průběhu hladin a bodových rychlostí byly zpracovány do několika grafů (Graf 7.7 – Graf 7.12), rozdělených pro každé měření. Body pro měření jsou vybrány v profilech osazení dvou dřevěných hranolů, na kterých byly osazeny měřicí sondy. V profilu jedna byly osazeny měřicí sondy s pořadovým číslem 1 až 7, v profilu dva se jednalo o měřicí sondy s pořadovým číslem 8 až 15. Vzdálenosti na ose X jsou vztaženy k levé stěně říčního žlabu, od které probíhalo měření digitálním hloubkoměrem. Měření bodových rychlostí probíhalo manuálním vkládáním měřicí sondy přístroje THERM 2285-2 (Obr. 7.12) do proudící vody z posuvné lávky, umístěné na kolejnicích říčního žlabu.

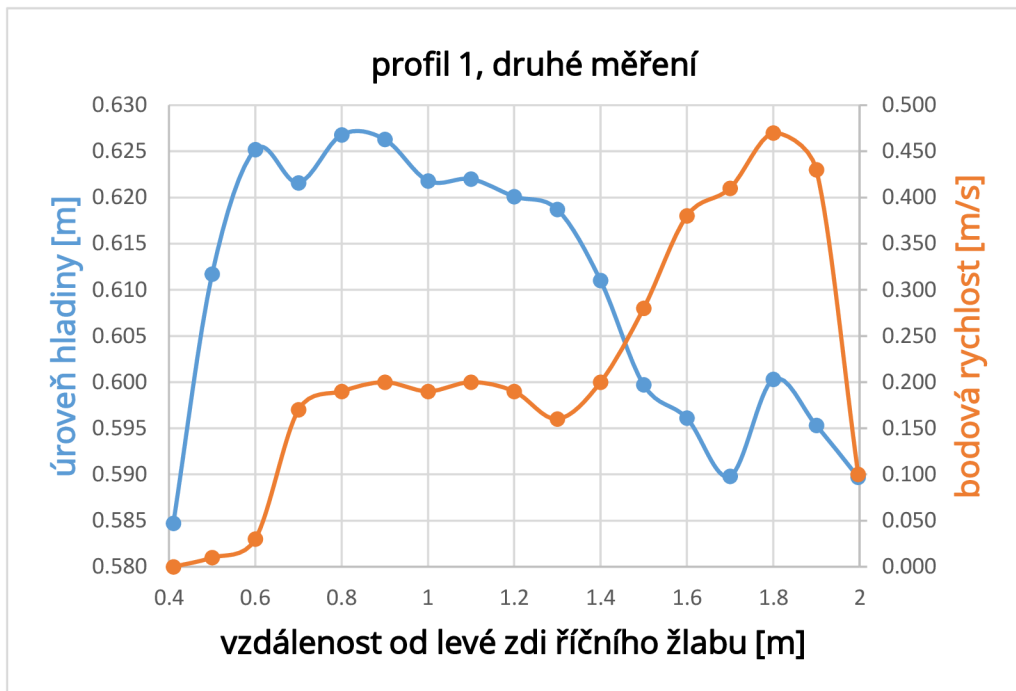
Graf 7.7 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po prvním měření – profil 1



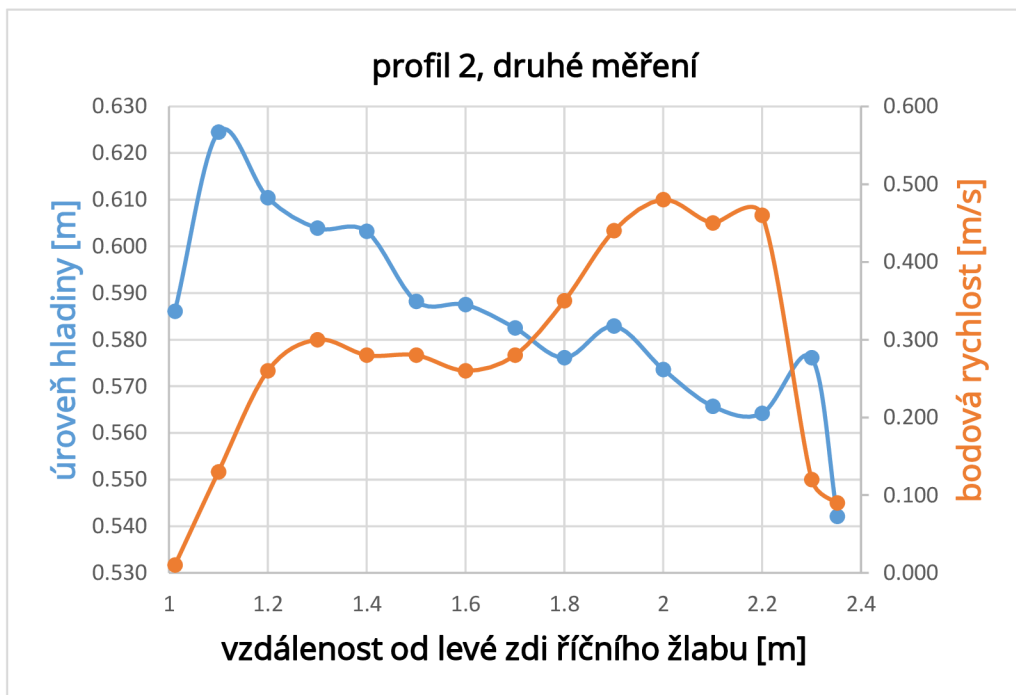
Graf 7.8 - Průběh hladiny a bodové rychlosti po prvním měření – profil 2



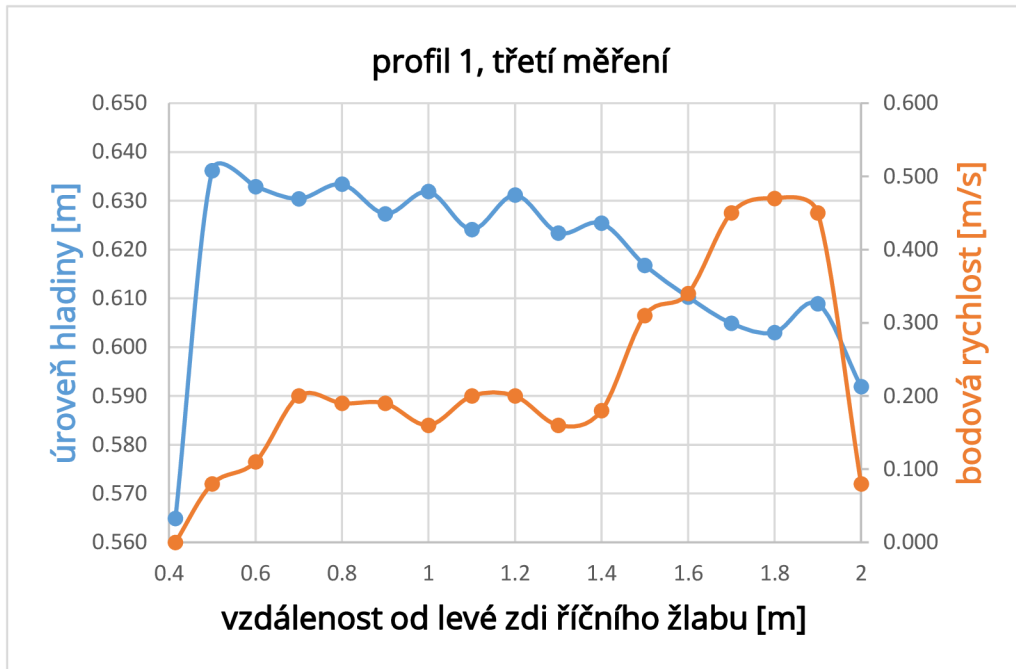
Graf 7.9 - Průběh hladiny a bodové rychlosti po druhém měření – profil 1



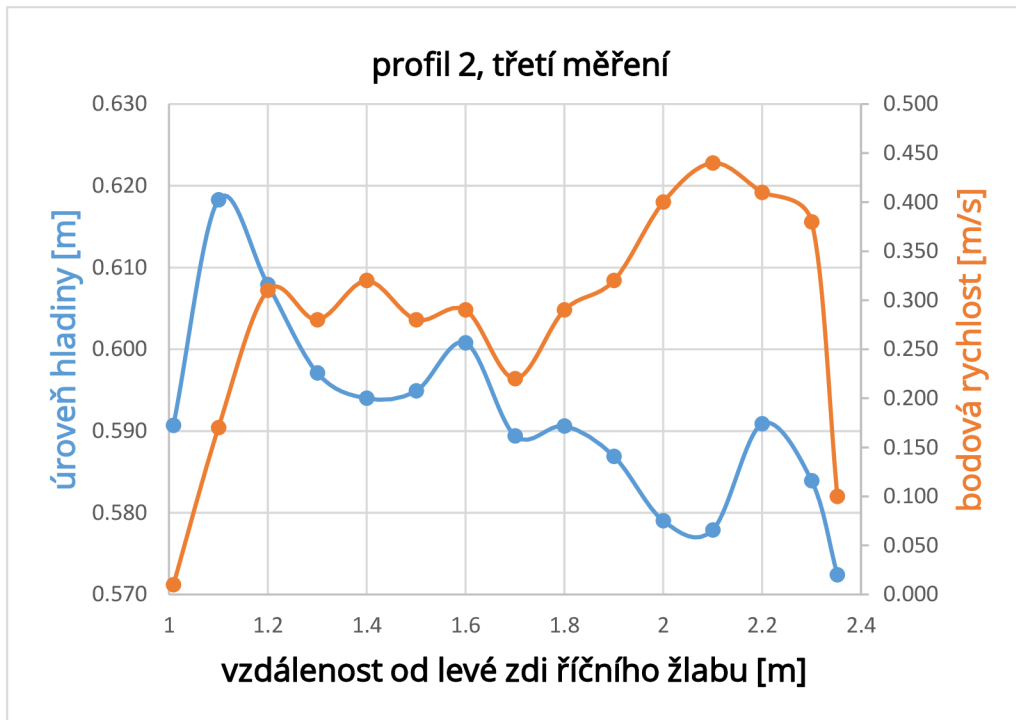
Graf 7.10 - Průběh hladiny a bodové rychlosti po druhém měření – profil 2



Graf 7.11 - Průběh hladiny a bodové rychlosti po třetím měření – profil 1



Graf 7.12 - Průběh hladiny a bodové rychlosti po třetím měření – profil 2

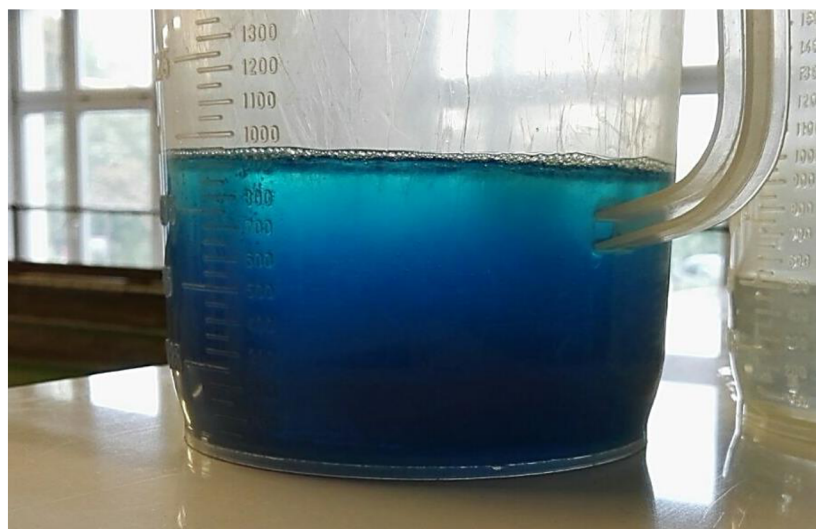


Z grafů může zjistit, že nejnižší hodnota bodové rychlosti byla měřena v bermě koryta a pohybovala se v rozsahu 0,001 – 0,28 m/s. Nejvyšší hodnota se pohybovala v rozsahu 0,30 – 0,47 m/s, a byla stanovena v kynetě koryta. Tento výsledek potvrzuje deformace dna modelu, které je nejvýraznější právě v kynetě říčního profilu, ale také dráha šíření znečištění, jejíž vizualizace byla simulována vodným roztokem brilantní modři E133 (Obr. 7.14).

Koncentrace vodného roztoku kuchyňské soli v požadovaném množství byla připravena vážením NaCl na laboratorní váze KERN 822 a za stálého míchání bylo uvedené množství soli rozpuštěno v horké destilované vodě. Následně se roztok nechal zvolna vychladnout a po dosažení teploty v laboratoři, která byla v době provádění experimentu 23°C, byl zahájen experiment.

Při přípravě roztoku WC Savo gel nastal problém s jeho rozpustností. Při dodržení požadované teploty začal vodný roztok WC gelu po určitém čase od přípravy roztoku ve větším objemu měnit svou charakteristiku a usazoval se na dně nádoby (Obr. 7.13). Bylo proto nutné tento roztok neustále míchat i po jeho přelití do dávkovacího barelu.

Teplota všech vodných roztoků simulujících šíření znečištění ve vodním toku aplikovaných na fyzikální model byla totožná s teplotou vody v přiváděné na fyzikální model, která se v době realizace experimentu pohybovala v rozsahu  $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ .



*Obr. 7.13 – Změna hustoty vodného roztoku WC gelu v čase*

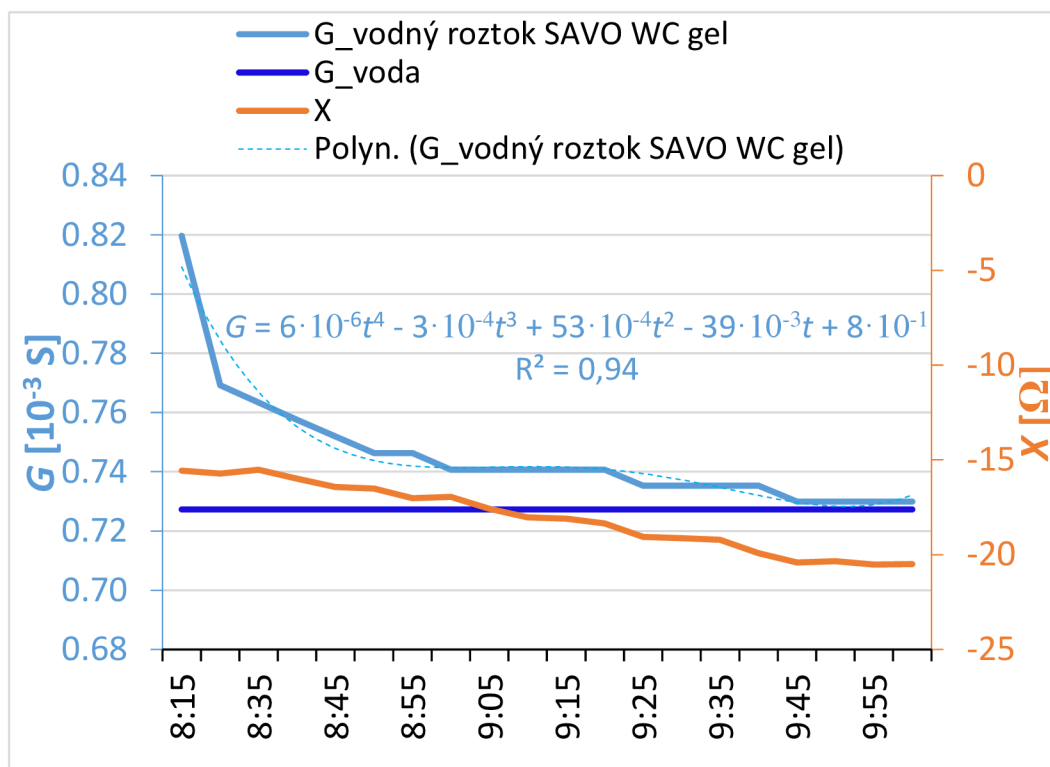
Pro vizuální představu, jak se znečištění simulované vodnými roztoky vybraných látek šíří fyzikálním modelem (Obr. 7.14), byl využit vodný roztok sytě modrého potravinářského barviva dostupného pod obchodním názvem brilantní modř E133.



*Obr. 7.14 – Vizualizace šíření znečištění vodným roztokem brilantní modři*

Pro simulaci šíření znečištění na fyzikálních modelech se často využívá vodný roztok NaCl. Jeho výhodou je dostupnost ekonomická i z hlediska zásoby. Nevýhodou je naopak změna měřeného pozadí po aplikaci na fyzikální model, neboť se na nezatíženém modelu mohou objevit krystalky soli, a především může nevhodně působit na používanou čerpací techniku a její okruhy, kde na kovových prvcích může zapříčinit vznik koroze. Proto bylo smyslem a cílem mé práce ověřit alternativní látku, která by splňovala podmínku dostupnosti a po aplikaci by po sobě nezanechávala negativní vlivy. Z uvedeného důvodu jsem volil látku savo, která se běžně využívá v domácnostech, a proto vedle podmínky ekonomické a množství dostupnosti splňuje i podmínky hygienické. Opodstatněnost volby podpořil provedený test časové změny hodnot elektrické vodivosti  $G$ , tedy stanovení doby odeznění vlivu látky savo na měřené pozadí (Graf 7.13).

Graf 7.13 - Časová změna elektrické vodivosti látky savo



Na základě dosaženého výsledku je možné konstatovat, že po 1,5 h byly měřeny hodnoty  $G$  vodného roztoku látky Savo na stejné úrovni jako pro vodu ze zásobní nádrže. Tím byl ověřen předpoklad, že použité vodné roztoky látky Savo neovlivní ani hodnoty sledované experimentem. Na druhou stranu definovaly časový limit jeho trvání.

Přesto, z důvodu eliminování případného vlivu změny elektrické vodivosti proudící vody a z důvodu zaměření dna po ukončení experimentu, bylo měření bylo prováděno vždy jednou za den.

Celkem byly provedeny čtyři varianty experimentu v následujícím pořadí

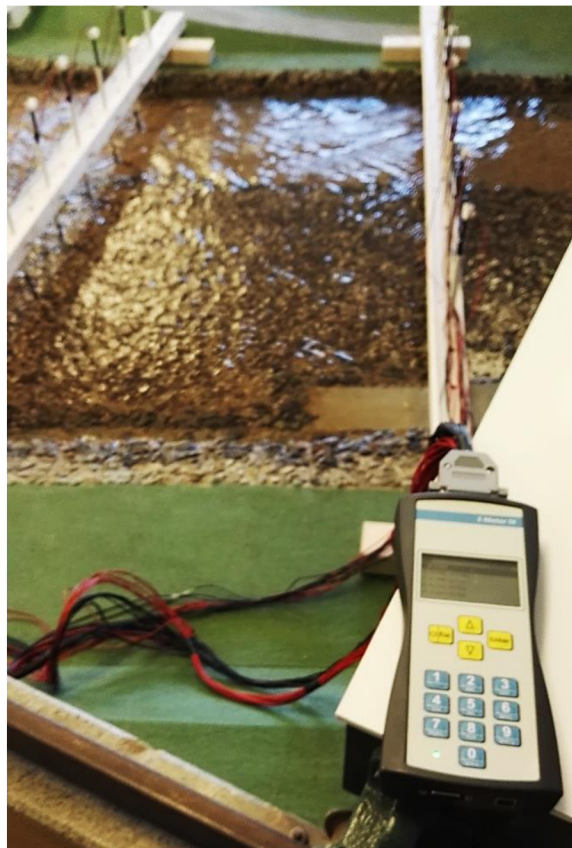
- vodný roztok Savo original dávkovaný do hladiny vody proudící fyzikálním modelem,
- vodný roztok Savo original dávkovaný pod hladinu vody proudící fyzikálním modelem,
- vodný roztok Savo WC gel dávkovaný pod hladinu vody proudící fyzikálním modelem,
- vodný roztok kuchyňské soli NaCl dávkovaný pod hladinu vody proudící fyzikálním modelem.

Fyzikální model byl vždy zatížen jednotným průtokem vody  $Q = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$  a barel s dávkovaným vodným roztokem látky simulující znečištění byl vždy ve stejné pozici. Pro každé měření bylo vyhotoveno celkově 5l roztoku obsahujícího vždy zvolenou koncentraci simulační látky. Před zahájením experimentu šíření znečištění ve vodním toku byla všemi sondami změřena elektrická vodivost vody způsobující hydrodynamické zatížení modelu tzv. pozadí při měření, která byla při přepočtu koncentrace znečištění v měřených profilech od hodnot zjištěných jednotlivými sondami odečtena.

Parametry měření přístrojem Z-metr IV byly při všech variantách experimentu následující:

- měřicí frekvence  $f = 8 \text{ kHz}$ ,
- amplituda měřicího napětí  $U = 1 \text{ V}$ ,
- perioda měření  $T = 100 \text{ ms}$ ,
- počet opakování měření  $n = 10$ .

Dalšími sledovanými veličinami byly teplota zatěžovací vody  $t_{H2O}$  a teplota vzduchu  $t_{vz}$  v laboratoři.



*Obr. 7.15 – Umístění Z-metru IV při měření na modelu*



## 8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

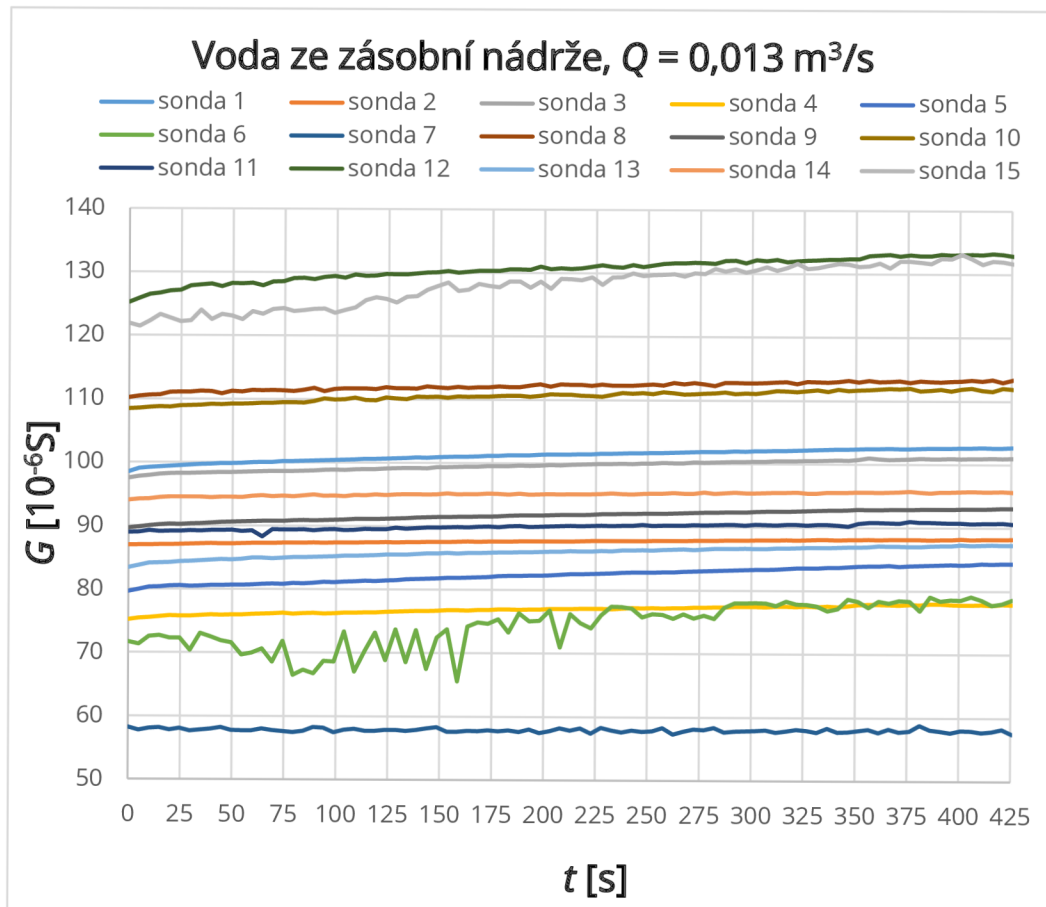
### 8.1 PRVNÍ MĚŘENÍ

Prvním měřením byla jednotlivými sondami zjištěna elektrická vodivost vody proudící ze zásobní nádrže recirkulačního systému. Uvedené měření stanovovalo tzv. hodnotu pozadí experimentu, která dále sloužila ke kontrole a případné eliminaci změn hodnot pozadí po přidání roztoku se simulační látkou.

Experiment byl proveden při:

- teplotě vody  $t_{H_2O} = 21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  a
- teplotě vzduchu  $t_{vz} = 27,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Graf 8.1- Závislosti časové změny elektrické vodivosti vody



Z uvedených charakteristik lze konstatovat 46,1% rozptyl mezi maximální a minimální počáteční hodnotou elektrické vodivosti měřenou jednotlivými sondami. Poněvadž konstrukci jednotlivých sond byla věnována zvýšená pozornost, lze se domnívat, že na hodnotě uvedeného rozptylu se podílí charakteristiky použitého měděného vodiče. Bohužel nebylo možno vyrobit všechny sondy z vodičů z jednoho zdroje. Dále je možno pozorovat, že měřené hodnoty  $G$  jsou na některých sondách v čase konstantní a na některých vykazují mírné zvýšení v intervalu přibližně do 4,5%. Je možné předpokládat, že na uvedeném jevu se podílí drobné nečistoty vyplavované např. z pohyblivého dna fyzikálního modelu. Přibližně 8,5% zvýšení hodnot  $G$  v čase je potom stanovené pro sondu 3 a sondu 6.

Poněvadž charakteristiky časové změny elektrické vodivosti vody přiváděné na fyzikální model zjištěné s odstupem 1 den po aplikaci vodných roztoků Savo original a Savo WC gel nevykazovaly odchylky od charakteristik dle Graf 8.1, pouze se snížila hodnota procentuálního nárůstu na 2,8% pro všechny sondy, nejsou tyto dále samostatně diskutovány ani uváděny.

## 8.2 DRUHÉ MĚŘENÍ

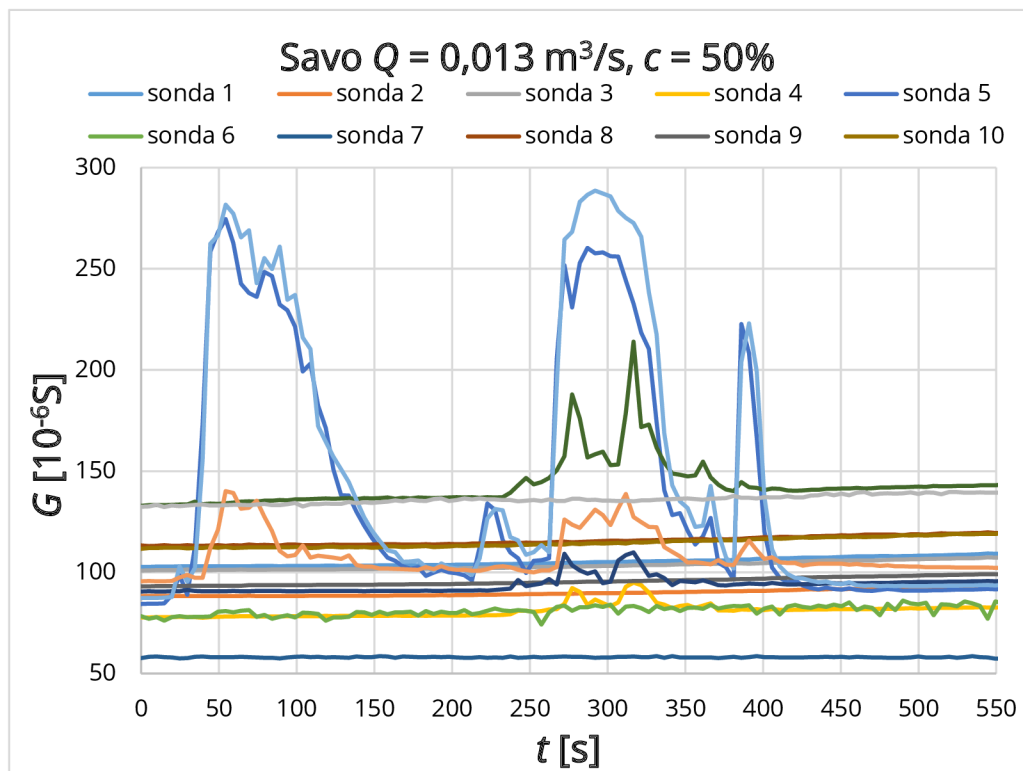
Při druhém měření byl ze zásobního barelu do hladiny vody přiváděné na fyzikální model vodního toku dávkován vodný roztok Savo original v koncentraci 50%.

Problematika týkající se nevhodnosti dávkování vodného roztoku látky simulující znečištění do hladiny již byla diskutována. Důsledkem nekontinuálního zatížení vodního toku simulovaným znečištěním mohou být dva výrazné vrcholy měřené sondami 5, 13 a menší vrchol měřený sondou 14. Uvedené vrcholy byly zaznamenány v 55 s od zahájení měření, zatímco hlavní proud znečištění byl zjištěn v čase 300 s od zahájení měření a je zřejmý na všech sondách umístěných v kynetě toku. Dále je zajímavou skutečností, že obě maxima měřená sondou 13 vykazují odchylku pouze 1,7%.

Měření bylo provedeno při

- teplotě vody  $t_{H_2O} = 21,2 \text{ °C}$  a
- teplotě vzduchu  $t_{vz} = 27,6 \text{ °C}$ .

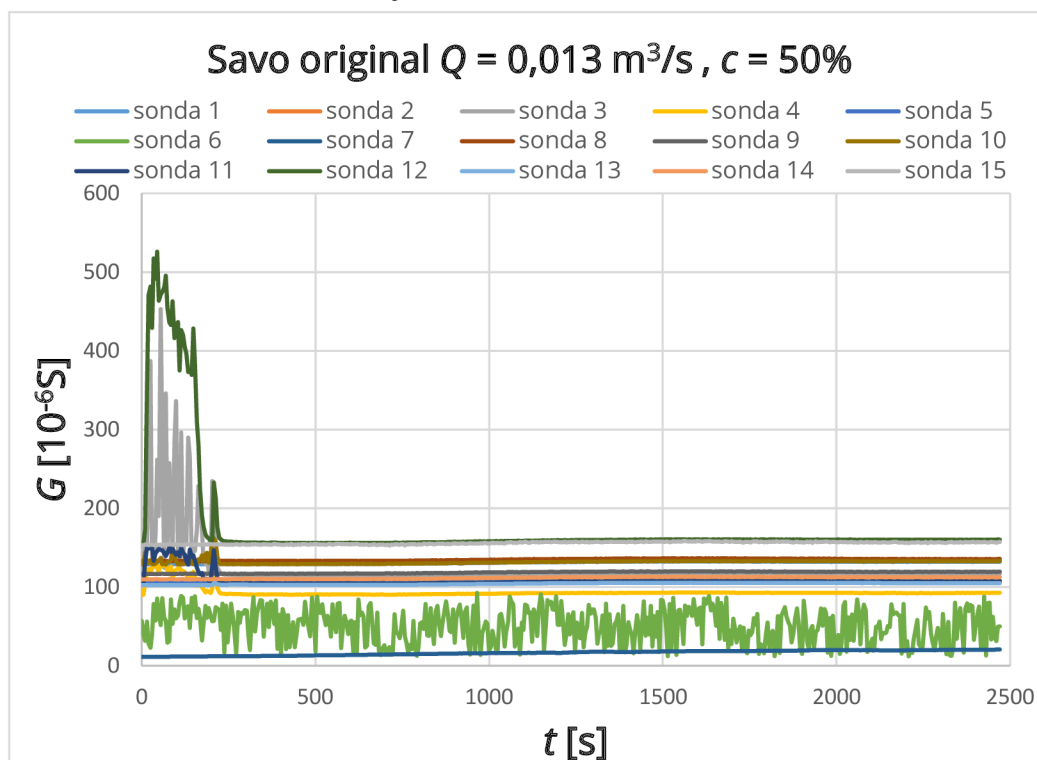
Graf 8.2 – Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava



### 8.3 TŘETÍ MĚŘENÍ

Třetí měření zachovává nastavené a měřené parametry druhého měření, neboť následovalo ve stejný den. Byl pouze zvolen delší časový úsek měření, aby bylo zjištěno, jak dlouho vodný roztok Savo original v dávkované koncentraci 50% ovlivňuje měřené hodnoty elektrické vodivosti proudící vody. Rovněž byla provedena změna dávkování vodného roztoku, který byl nadále přiváděn pod úroveň hladiny proudící vody.

Graf 8.3 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo



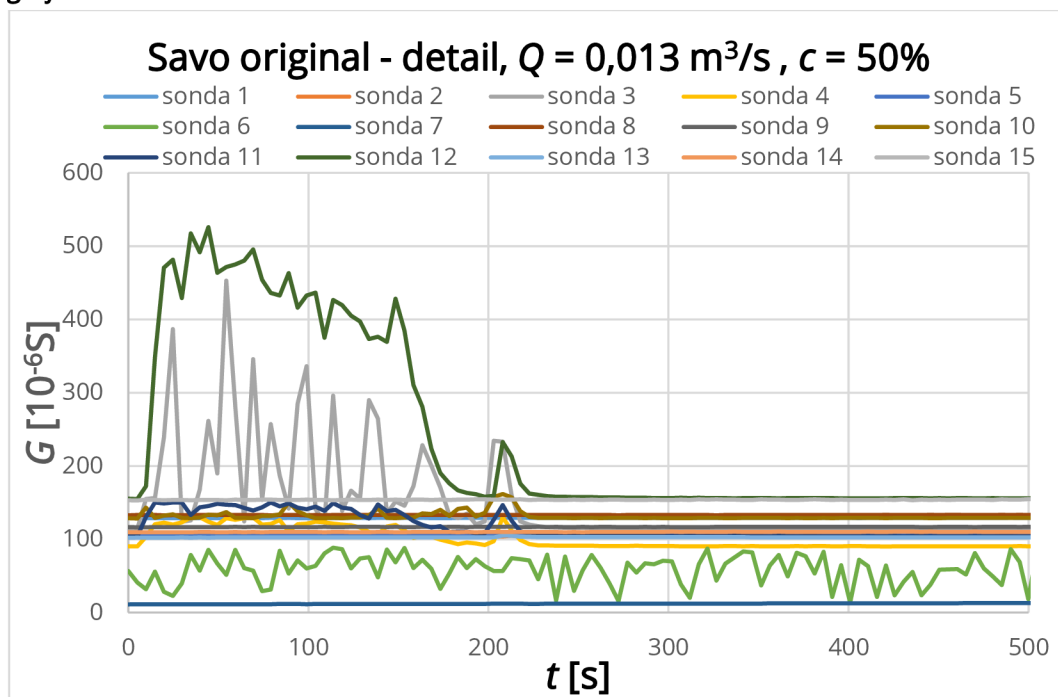
Z uvedeného průběhu (Graf 8.3) je zřejmý dopad kontinuálního dávkování stejného průtoku vodného roztoku Savo original do fyzikálního modelu vodního toku. Nejvyšší vrcholy byly sondou 3 a 12 zaznamenány ve 44 s od zahájení měření a jejich maxima jsou o 84% vyšší než v předchozí variantě experimentu. Uvedená skutečnost však může být způsobena krátkým časovým odstupem od předcházející varianty experimentu. Není sice pravděpodobné, že by zůstala látka Savo original v proudící vodě, ale nelze vyloučit její ulpění v materiálu pohyblivého dna modelu.

Z uvedeného průběhu je možno diskutovat některé další skutečnosti, které by bylo možno považovat za výhody:

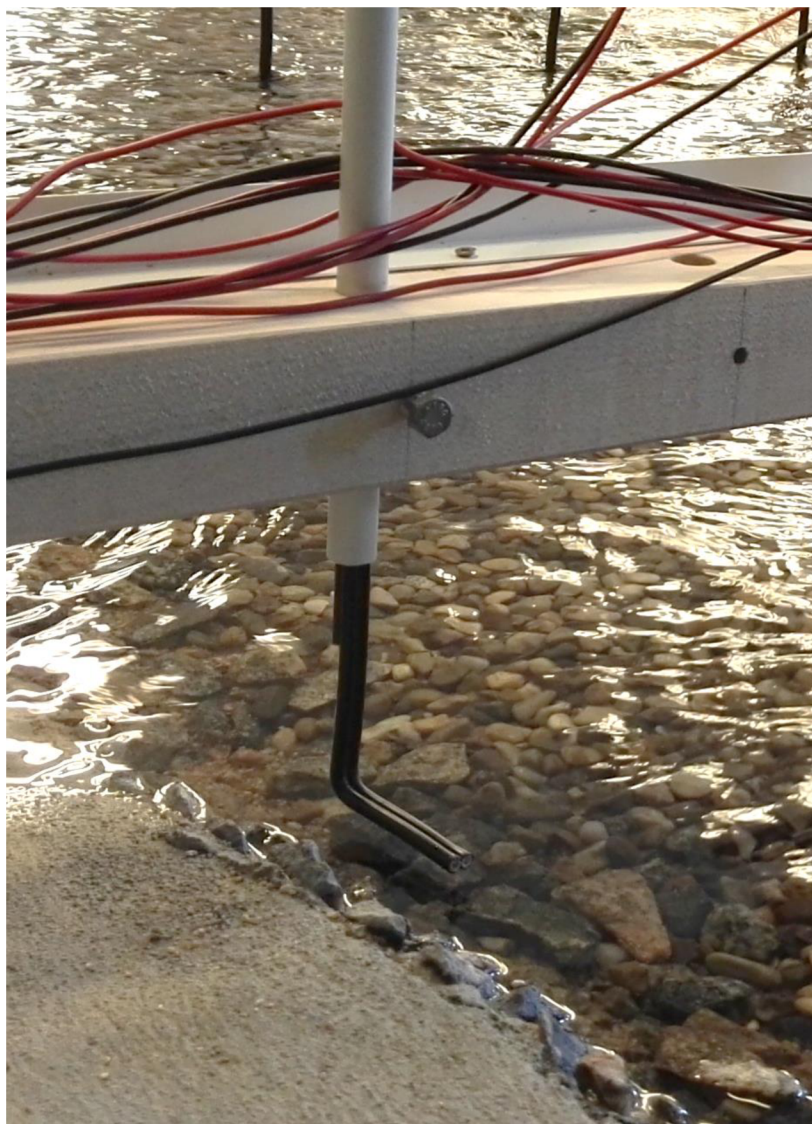
- 50% koncentrace vodného roztoku Savo original vyvolává dobře identifikovatelné změny elektrické vodivosti proudící vody v měřených profilech,
- v objemu vody proudící ze zásobní nádrže na fyzikální model přibližně po 300 s od ukončení dávkování nezanechává měřitelné změny elektrické vodivosti.

Použití vodného roztoku Savo original na simulaci šíření znečištění na fyzikálních modelech je výhodou, jelikož rychle vyprchá a umožňuje častější opakování měření, nezanechává stopové množství jako je tomu třeba u vodného roztoku kuchyňské soli NaCl. Počáteční výhoda - rychlé vyprchání látky Savo original z vody je také jeho hlavní nevýhodou, a to především ekonomickou. Savo original je sice komerčně dostupné ekonomicky, lze jej skladovat a je ekologické, avšak pro déle trvající experimenty by mohlo představovat určitou finanční zátěž a také nutnost vybudování dostatečně objemného zásobníku pro dávkovaný vodný roztok. Další nevýhodou je zejména to, že sledovanou změnu elektrické vodivosti proudící vody vyvolává pouze na krátkou dobu. Proto bych jej nedoporučil aplikovat při déle trvajících experimentech.

**Graf 8.4 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu**



Z detailu (Graf 8.4) předchozí závislosti je zřejmé, že hodnoty elektrické vodivosti naměřené sondou 7 jsou de facto konstantní, velmi blízké nule a neodpovídají průběhům zjištěným ostatními sondami. Po následovném přezkoumání měřicích sond, bylo zjištěno, že sonda 7 i při průtoku  $Q = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$  není dostatečně ponořena (Obr. 8.1) Poměrně výrazné fluktuace měřeného signálu zaznamenává sonda 6, avšak tato sonda vykazovala časovou nestabilitu již při úvodním testování a dále byla po dobu trvání experimentu ponořena velmi blízko úrovni hladiny vody. Vlivem povrchového napětí v hladině vody proto docházelo k jejímu částečnému vynořování. Uvedený jev tedy pravděpodobně není důsledkem změn koncentrace simulovaného znečištění.



*Obr. 8.1 – Měřicí sonda 7 nad hladinou vody*

## 8.4 ČTVRTÉ MĚŘENÍ

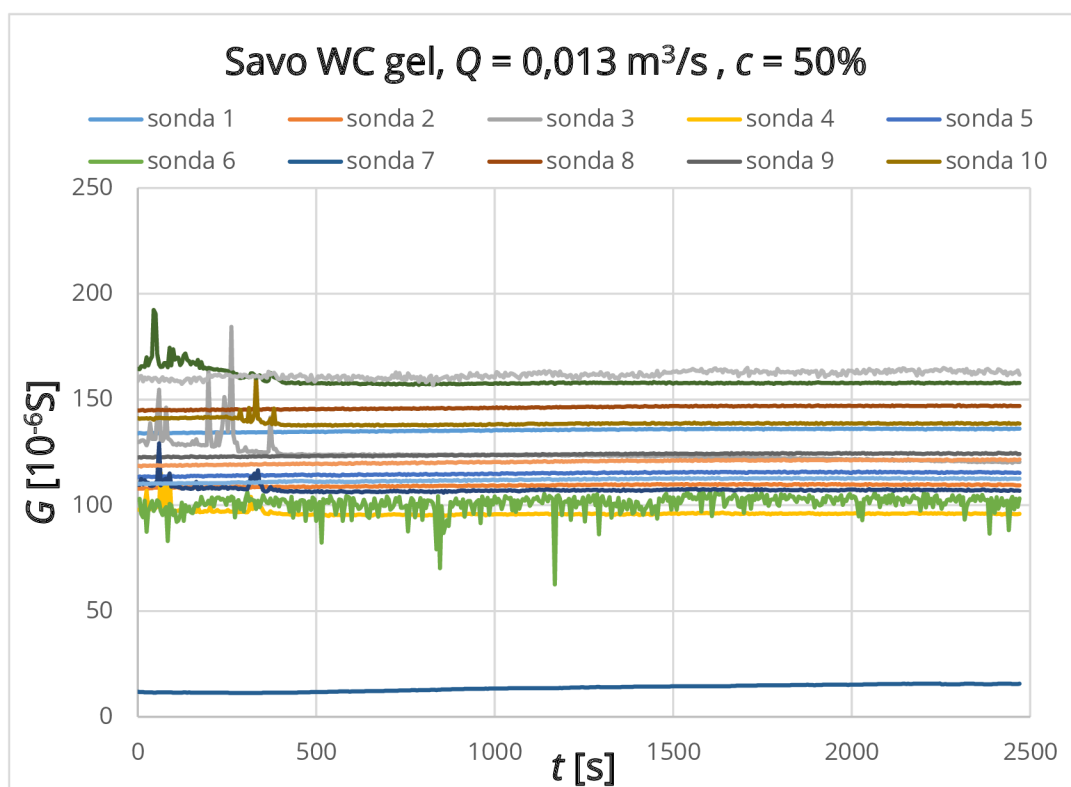
Ve čtvrté variantě experimentu byl látkou simulující šíření znečištění ve vodním toku vodný roztok Savo WC gel v koncentraci 50%. Manipulace s tímto roztokem byla složitější z důvodu nutnosti jeho kontinuálního promíchávání.

Měření bylo provedeno následující den za podmínek:

- teplota vody  $t_{H_2O} = 21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- teplota vzduchu  $t_{vz} = 27,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Zjištěný průběh měřených časových charakteristik elektrické vodivosti kvantitativně i kvalitativně odpovídá předpokladu.

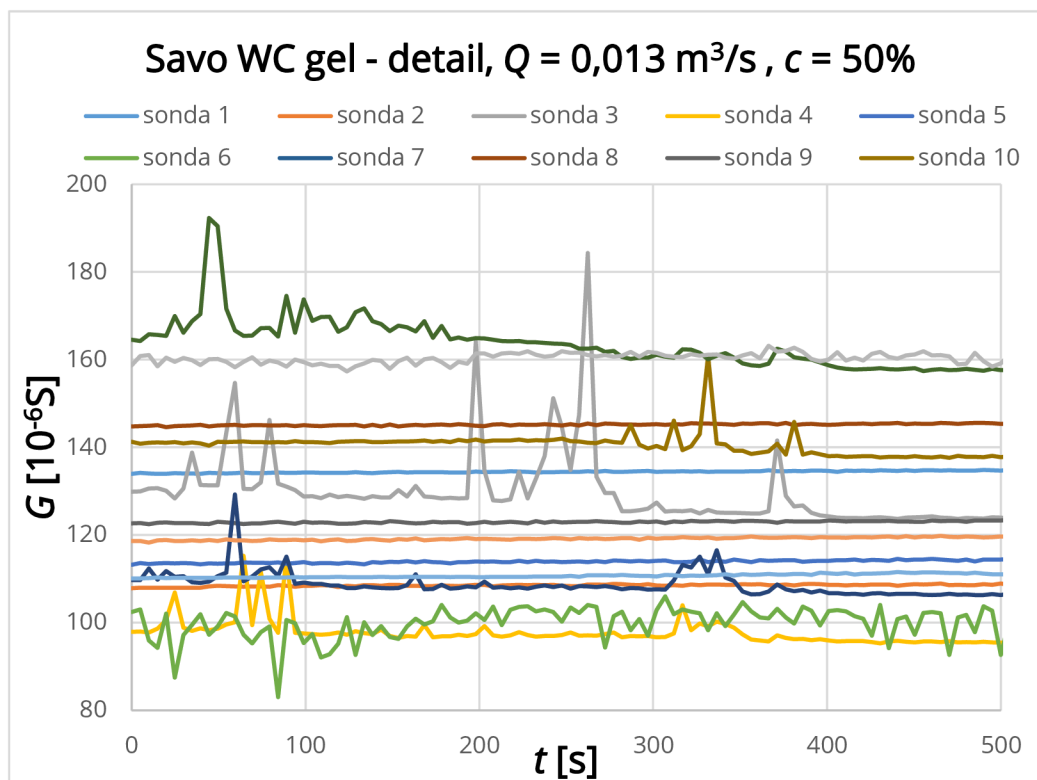
Graf 8.5 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu



Maximální hodnoty elektrické vodivosti byly rovněž zaznamenány sondami 3 a 12. Kvantitativně se pohybují na úrovni odpovídající druhému měření. Z časového hlediska se maxima objevují ve 45 s a sondou 3 je zaznamenáno druhé výrazné maximum v 262 s. Nedostatečné ponoření sondy 7 do proudící vody zůstává i v tomto experimentu stejně jako fluktuace zjištěné sondou 6.

Pro názornost je opět uveden detail průběhu změn elektrické vodivosti vody v počáteční fázi experimentu. Hodnoty měřené sondou 7 byly zanedbány z důvodu nečinnosti sondy.

**Graf 8.6 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu. Detail předchozího grafu**



Z detailu (Graf 8.6) vyhodnocených průběhů je zřejmé, že na šíření vodného roztoku Savo WC gelu zareagovala i sonda 10, která při aplikaci vodného roztoku Savo original žádné změny hodnot elektrické vodivosti vody nezaznamenala. Odečitatelné změny  $G$  se proti výsledkům dosaženým ve třetím měření přestaly objevovat po 400 s proti 250 s z třetího měření. Otázkou je, čím bylo prodloužení doby působení vodného roztoku Savo WC gelu ve fyzikálním modelu způsobeno. Pravděpodobnou příčinou může být vyšší hustota vodného roztoku uvedené látky při její 50% koncentraci.

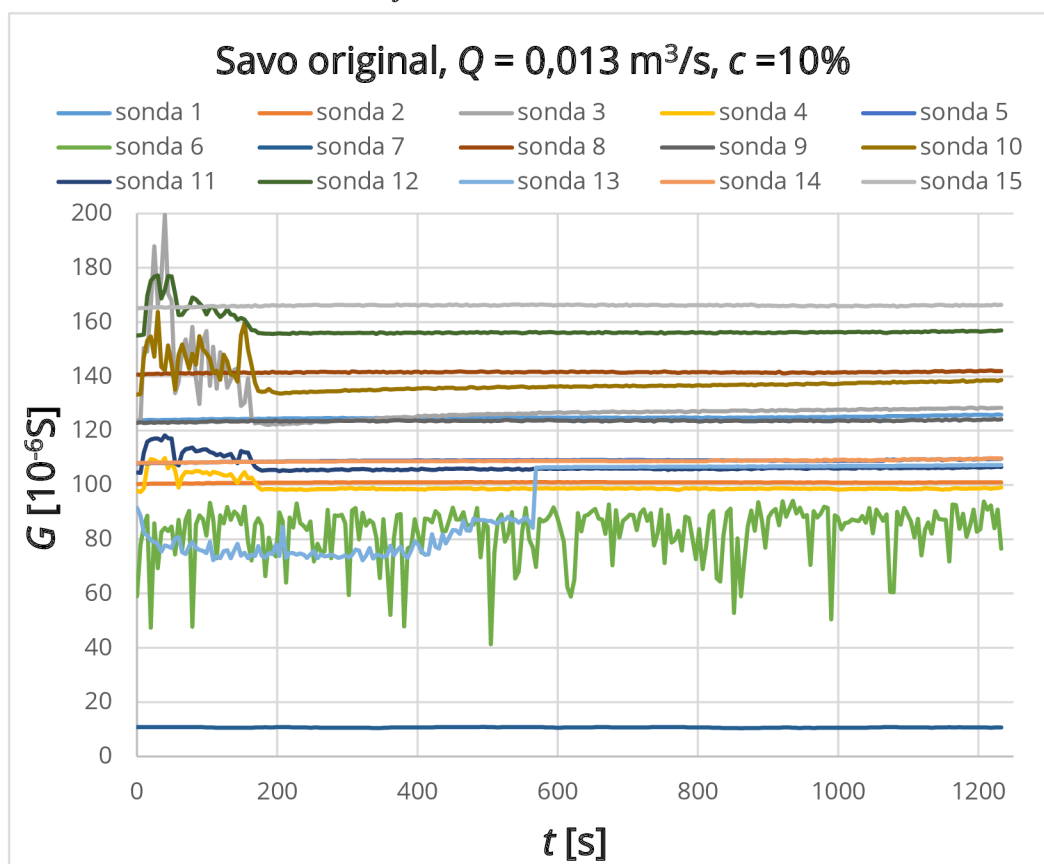


## 8.5 PÁTÉ MĚŘENÍ

Vzhledem k možným problémům simulace šíření znečištění ve vodním toku v důsledku použití vodných roztoků látek s vyšší hustotou byla provedena další měření opět ve stejné konfiguraci experimentu, ale s počáteční koncentrací vodných roztoků látek 10%. Při aplikaci vodného roztoku Savo original byla

- teplota vody  $t_{H_2O} = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- teplota vzduchu  $t_{vz} = 26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

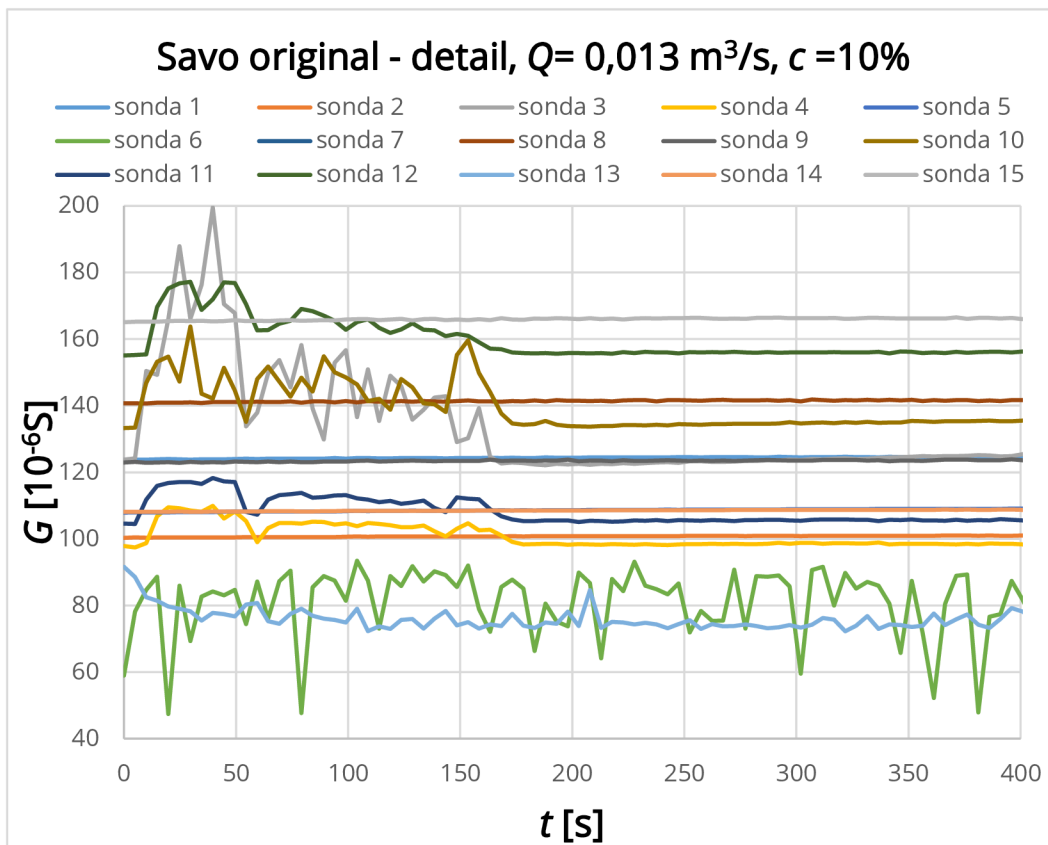
Graf 8.7 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo



Na základě vyhodnocených průběhů (Graf 8.7) lze konstatovat, že je možno pro simulaci šíření znečištění ve vodním toku na fyzikálním modelu využít i vodné roztoky látek na bázi Savo s nízkou koncentrací a zlepšit tak hlavně ekonomické hledisko této metody. Průběhy zaznamenané sondami 7 a 6 potvrzují i v tomto případě předešlá zjištění. Odlišný průběh je zaznamenan sondou 13, kde až od 325 s dochází k pomalému zvyšování hodnot měřené elektrické vodivosti. Tento trend je ukončen ve 490 s, následuje krátký úsek ustálených hodnot a v 560 s skoková změna na hodnoty měřené sondou 14.

Přesto lze konstatovat, že kvantitativně i kvalitativně vyhodnocené průběhy odpovídají zjištěním uvedeným ve třetím měření s výjimkou doby pozorovaných změn, která se z 250 s zkrátila na cca 180 s.

**Graf 8.8 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu**

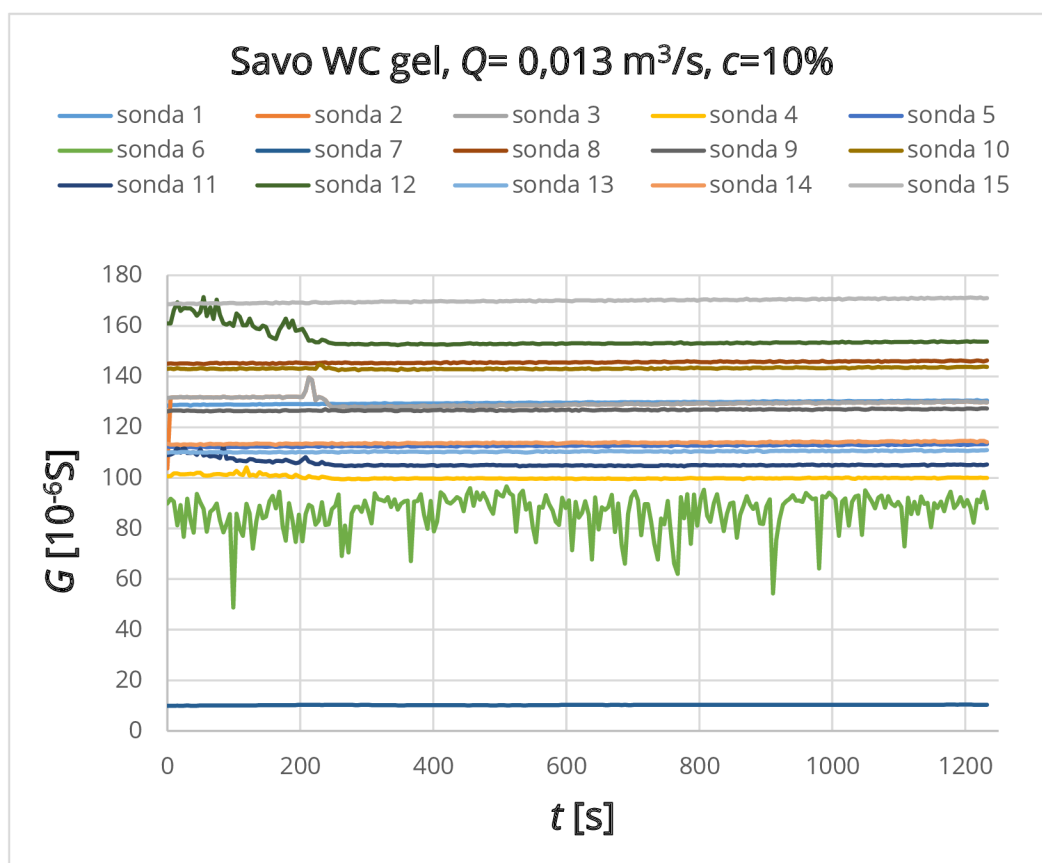


## 8.6 ŠESTÉ MĚŘENÍ

Šesté měření bylo realizováno s aplikací vodného roztoku Savo WC gel s koncentrací 10%, která předpokládala vyloučení vlivu hustoty uvedeného roztoku. Koncepte experimentu i všechny jeho další parametry byly dodrženy, měřené teploty byly

- teplota vody  $t_{H_2O} = 20,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- teplota vzduchu  $t_{vz} = 26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

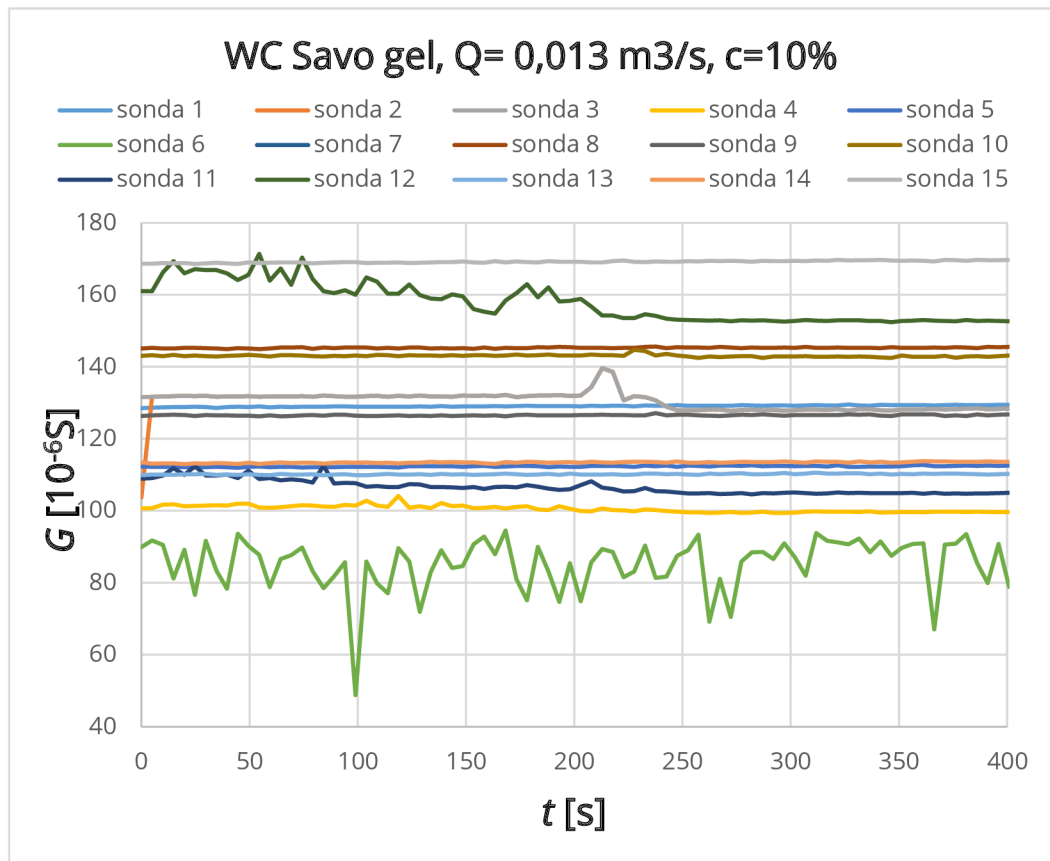
Graf 8.9 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu



Z vyhodnocené závislosti  $G = f(t)$  je možno konstatovat kvalitativní shodu s předcházejícími průběhy. Kvantitativně zjištěné hodnoty elektrické vodivosti odpovídají výsledkům pátého měření, a to včetně doby, po kterou bylo možné změny v charakteristikách pozorovat. V případě vodného roztoku Savo original byla doba 180 s, v případě Savo WC gel byla odečtena doba 240 s, tj. o cca 33% delší.

Při srovnání s výsledky čtvrtého měření však došlo k výraznému zkrácení doby s pozorovatelnou reakcí na znečištění vody, a to ze 400 s na 240 s, tj. o 40%. Kvantitativní rozdíl hodnot měřených sondou 12 ve čtvrtém a šestém měření je 12%.

Graf 8.10 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu



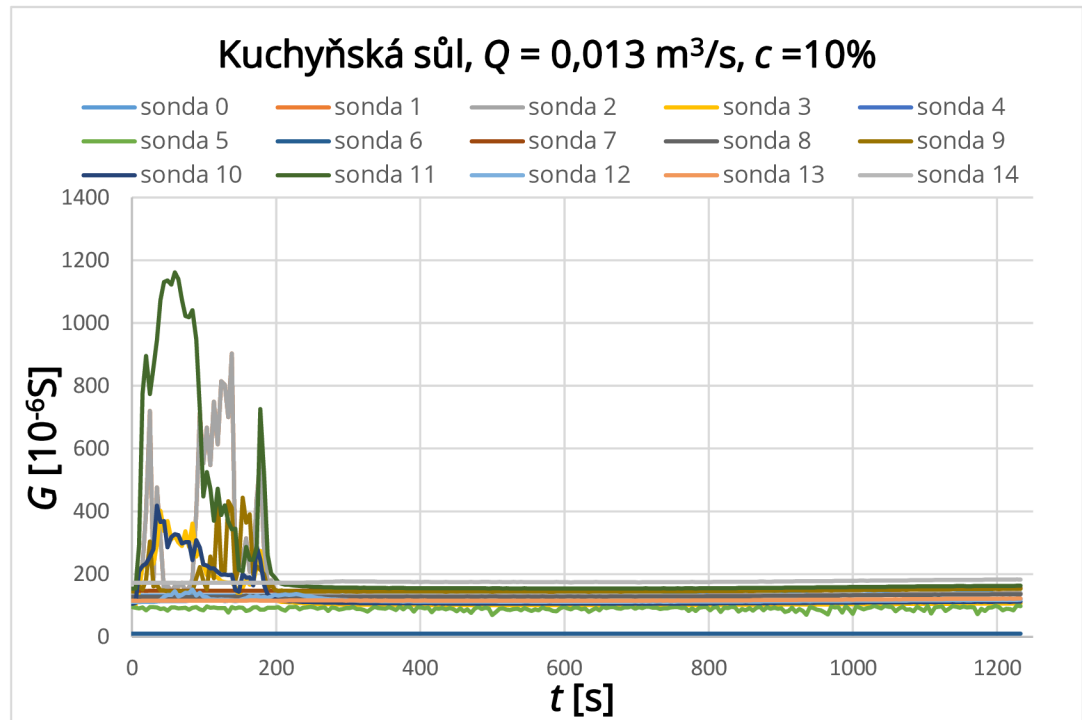
## 8.7 SEDMÉ MĚŘENÍ

V mnoha laboratorních aplikacích se jako simulační roztok využívá vodný roztok kuchyňské soli NaCl. Vzhledem k jeho dostupnosti, poměrné jednoduchosti při manipulaci a možnosti připravit širokou škálu jeho koncentrací byl využit i v experimentu šíření znečištění ve vodním toku. Je však třeba upozornit, že ne vždy je snadné připravit skutečně homogenní směs rozpouštědla – vody z recirkulačního laboratorního systému a rozpouštěné látky – kuchyňské soli při dodržení zadaných podmínek realizace experimentu.

V posledním sedmém měření byl tedy na fyzikální model aplikován vodný roztok NaCl připravený v koncentraci 10% za dodržení podmínek měření stejných jako v předchozích variantách experimentu. Dodržena byla při měření i

- teplota vody  $t_{H_2O} = 20,9 \text{ } ^\circ\text{C}$  a
- teplota vzduchu  $t_{vz} = 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

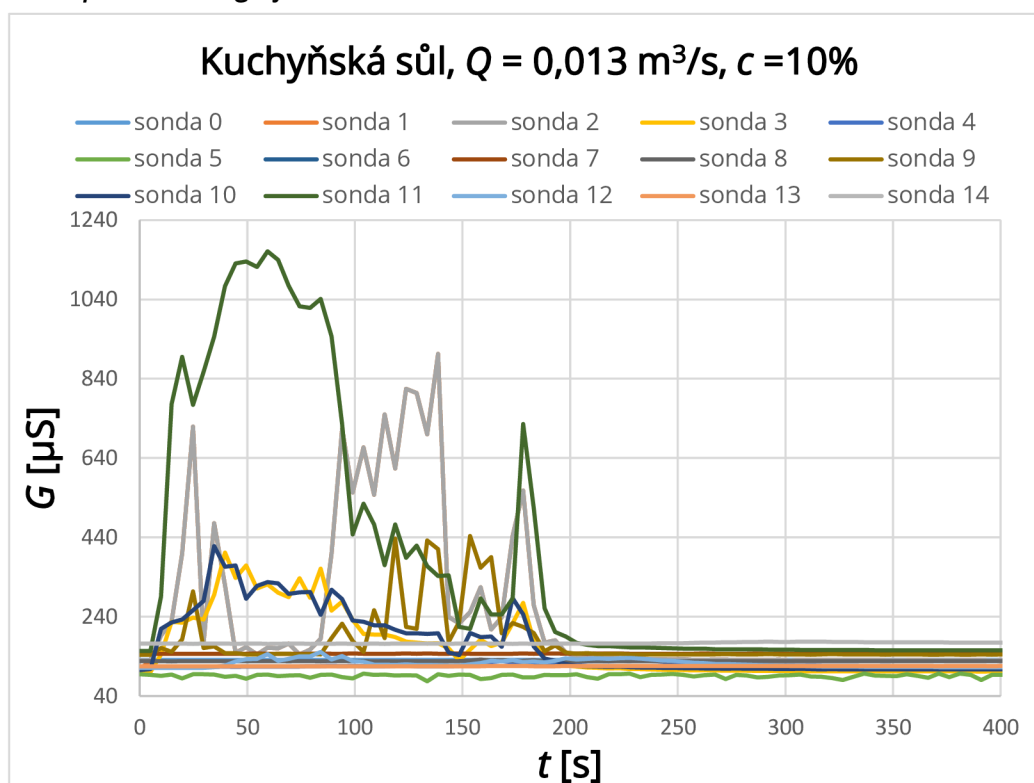
Graf 8.11 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku kuchyňské soli NaCl



Opět je možné konstatovat shodný kvalitativní průběh zjištěných charakteristik elektrické vodivosti. Maximální hodnoty  $G$  byly měřeny sondou 11 v čase 45 s od zahájení experimentu. Je možno konstatovat nejvýraznější reakce na celkem pěti sondách, přičemž charakteristiky měřené sondami 7 a 6 odpovídají předchozím pozorováním a z dalšího hodnocení je možné je opět vyloučit. Rovněž lze konstatovat, že při dané koncepci experimentu měřitelné změny hodnot elektrické vodivosti odeznívají po cca 200 s od zahájení experimentu, což potvrzuje správnost předchozích výsledků realizovaných s vodnými roztoky s látkou Savo ve stejné koncentraci 10%. Z kvantitativního hlediska jsou vyvolané změny hodnot elektrické vodivosti řádově vyšší než v případě předchozích vodných roztoků obou látek s prvkem Savo, což umožňuje snadněji specifikovat jejich přítomnost v prostoru i čase.

Bohužel jak bylo již zmíněno, i přes svou dobrou účinnost co se týče simulace znečištění na fyzikálním modelu, má vodný roztok NaCl svou značnou nevýhodu, a to je jemný film, který zanechává na dně modelu po ukončení jeho zatížení. Uvedená skutečnost může zkreslit případná další měření. Proto byl uvedený experiment proveden jako poslední v řadě. Další nevýhodou je, že kuchyňská sůl zůstává trvale v zásobním objemu vody používané k experimentům a může tak měnit úroveň monitorovaného pozadí. Zde je nutné konstatovat, že podobné experimenty na uvedeném recirkulačním systému v předchozím období realizovány nebyly, neboť elektrickou vodivostí měřená úroveň pozadí je pro všechny tři aplikované vodné roztoky testovaných látek přibližně shodná. Zatímco bylo ověřeno, že prvky Savo se po určité době eliminují, NaCl zůstává v systému oběhu vody přítomna a může se podílet na vzniku koroze systému.

**Graf 8.12 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku kuchyňské soli NaCl. Detail předchozího grafu**



## 9 MĚŘENÁ KONCENTRACE ZNEČIŠTĚNÍ

Provedené kalibrační a realizační varianty experimentu umožňují sestavení průběhu nebo map koncentrace znečištění pro vodné roztoky jednotlivých látek simulujících šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku. Na základě výsledků rozsáhlých měření byla pro všechny tři zkoušené látky zvolena aplikace vodného roztoku s jejich 10% koncentrací. V měřeném profilu 1 byly umístěny měřicí sondy 1 až 7 a v profilu 2 se nacházely sondy 8 až 15.

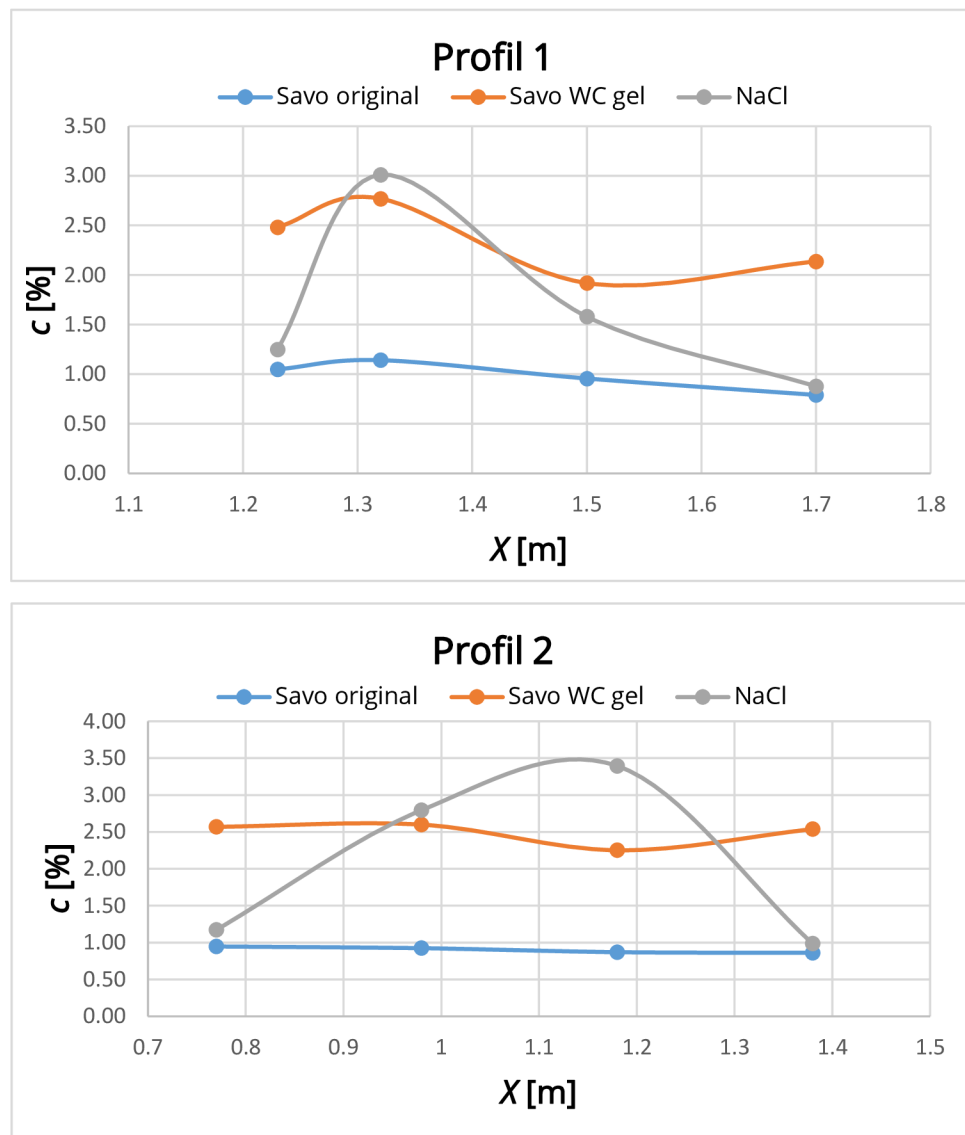
Vzhledem k doložené skutečnosti, že simulované znečištění se při dané konfiguraci experimentu šířilo převážně kynetou vodního toku, byly pro další zpracování zbytkových koncentrací látek simulujících znečištění a hodnocení zjištěných průběhů vybrány pouze sondy, které prokazatelně měřily změnu elektrické vodivosti zatěžující vody v důsledku transportu těchto látek. Vzhledem k nízkému počtu reagujících měřících sond a vzhledem k měření pouze ve dvou profilech bylo provedeno zpracování dosažených výsledků v programu MS Excel pro každý profil (Graf.9.1). Dále byly lineární triangulační interpolací v programovém prostředí Surfer vykresleny mapy průběhu izolinií koncentrací znečištění (Obr. 9.2).

Přepočet hodnot elektrické vodivosti  $G$  na hodnoty koncentrací  $c$  pro aktivní měřicí sondy byl proveden na základě kalibračních křivek (Tab.7.7). Vykreslen je průběh absolutních hodnot zjištěné koncentrace (Graf.9.1) stanovený tak, že od měřené hodnoty  $G$  byla nejdříve odečtena hodnota pozadí zjištěná při vyhodnocované variantě experimentu a následně byl proveden přepočet na hodnotu koncentrace.

Z uvedených závislostí (Graf.9.1) je zřejmé, že v profilu 1 byla pro všechny simulující látky zaznamenána maximální hodnota koncentrace znečištění v pozici 1,32 m. Z hlediska citlivosti jednotlivých látek je nejvýraznější maximum pro vodný roztok NaCl, dobře následovaný vodným roztokem látky Savo WC gel. Z kvalitativního hlediska, je však průběh pro látku Savo WC gel v pozici 1,7 m odlišný. Rozdíl může být způsoben již uvedenou chemickou změnou vodného roztoku látky v čase. Z kvalitativního hlediska jsou si naopak velmi blízké zjištěné průběhy koncentrací vodných roztoků látek NaCl a Savo original, a to

včetně minimálních kvantitativních odchylek na počátku v pozici 1,23 m, kde rozdíl činí 16% a na konci měřeného úseku v pozici 1,7 m je zjištěný rozdíl 9,9%. Na základě uvedeného výsledku by bylo možné konstatovat, že vodný roztok látky Savo original by mohl být vhodnou náhradou standardně užívaného vodného roztoku NaCl.

Graf 9.1 – Průběh koncentrace látek simulujících znečištění v měřených profilech



Uvedenou skutečnost příliš nerozporují ani průběhy koncentrací látek simulujících znečištění vodního toku zjištěné v profilu 2. Zřejmý je kvalitativně odlišný průběh koncentrace vodného roztoku NaCl. Uvedená skutečnost může mít souvislost s hustotním prouděním, kdy může docházet k jeho ulpívání na zrnech materiálu dna modelu a následnému nerovnoměrnému odplavování.



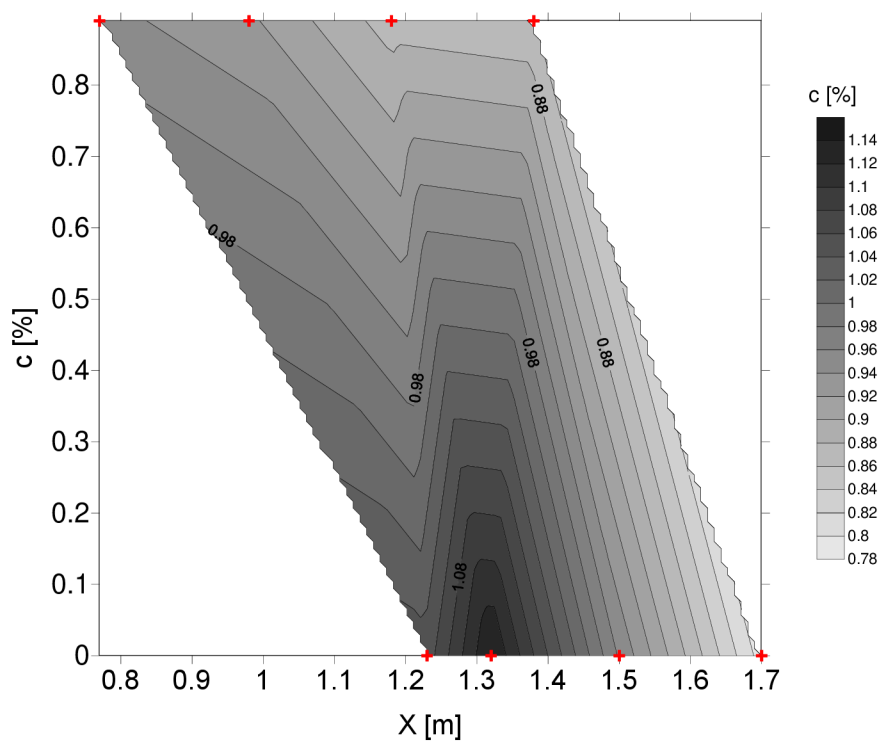
Průběh koncentrací vodných roztoků látek Savo byl z kvalitativního hlediska v profilu 2 shodný, což by uvedenou domněnku podpořilo.

Obdržené mapy zbytkových koncentrací simulovaného znečištění 10% vodných roztoků jednotlivých látek (Obr.9.2) byly podpořeny vizualizací proudění vodným roztokem brilantní modří (Obr.9.1). Je třeba konstatovat, že izolinie koncentrace jsou zkresleny v důsledku nezaměření staničení měřicích sond.

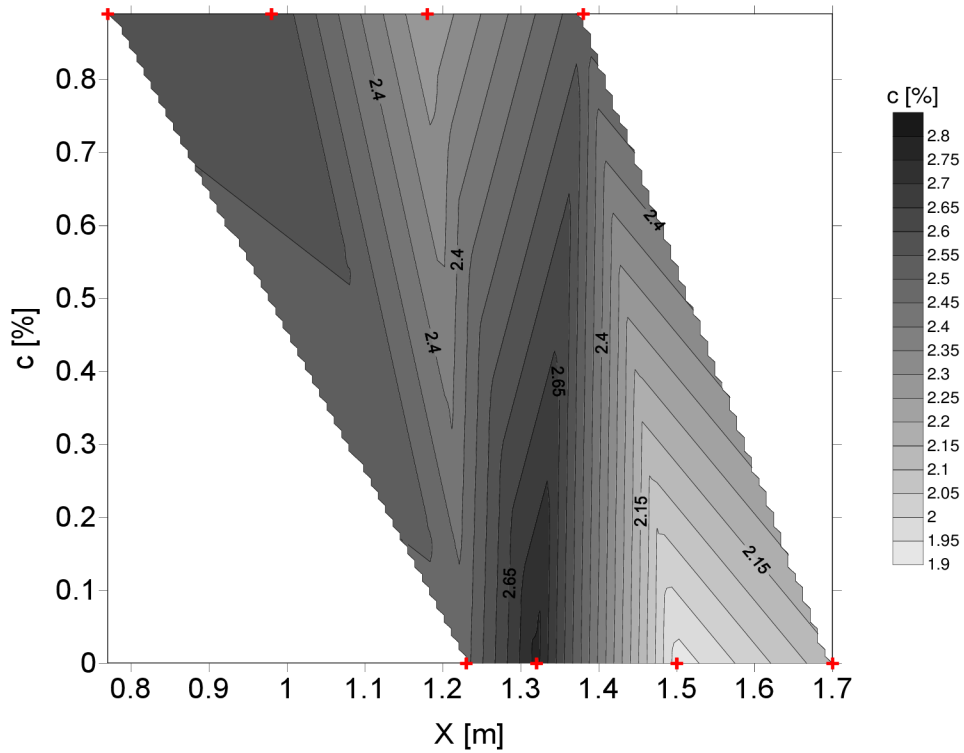


**Obr. 9.1 – Vizualizace proudění vodným roztokem brilantní modří**

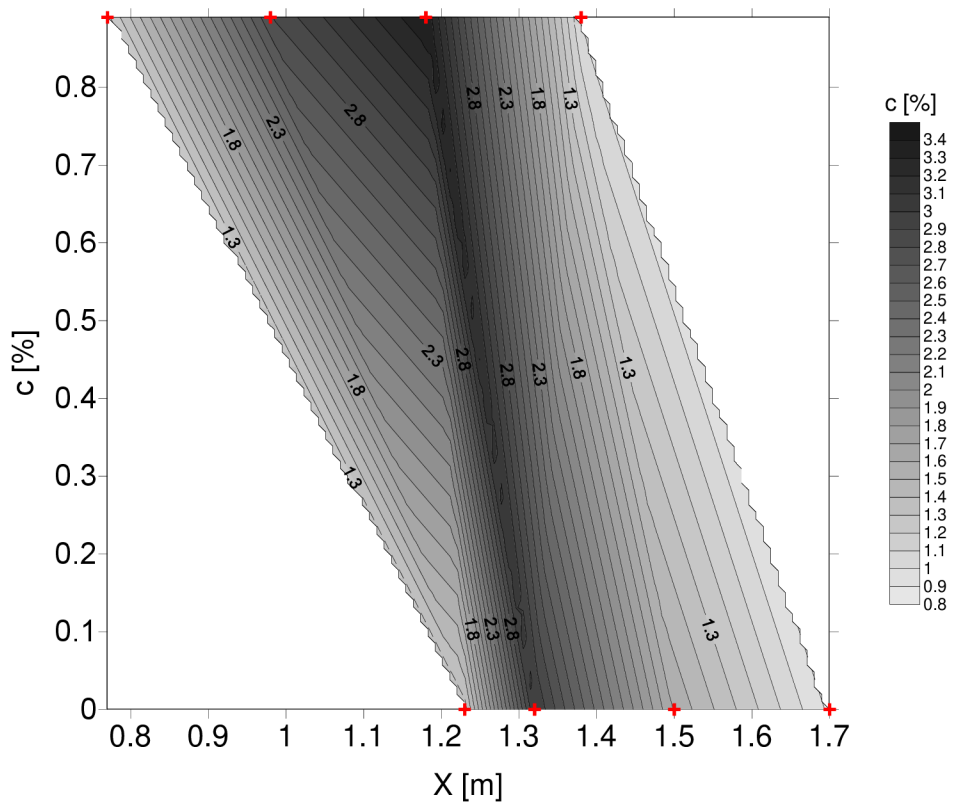
Mapa koncentrace zbytkového znečištění  
10% vodného roztoku Savo original



Mapa koncentrace zbytkového znečištění  
10% vodného roztoku Savo WC gel



Mapa koncentrace zbytkového znečištění  
10% vodného roztoku NaCl



Obr. 9.2 – Mapy zbytkových koncentrací simulovaného znečištění

## 10 ZÁVĚR

Při zpracování své bakalářské práce nazvané „Sledování šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku“ jsem provedl obsáhlý experimentální výzkum, který jsem rozdělil do dvou základních dílčích cílů – určení vhodné látky simulující šíření znečištění na fyzikálním modelu vodního toku a vyhodnocení koncentrace znečištění ve zvolených profilech fyzikálního modelu a při zvolených podmínkách měření, které zahrnovaly celkovou konfiguraci experimentu včetně měřitelných doprovodných veličin. Respektována byla rovněž skutečnost, že pro měření všech variant experimentu byla využita aparatura s přístrojem Z-metr IV. Přístroj byl realizován řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA a moje bakalářská práce byla řešena jako součást udržitelnosti uvedeného projektu.

První část práce se týkala kalibračních měření. Testované látky jsem volil s ohledem na jejich dostupnost ekonomickou, dosažitelnost z hlediska množství, vhodnost z hlediska ekologického a především vzhledem ke sledované problematice. Na základě vytyčených požadavků jsem k ověření zvolil dvě skupiny látek, a to pevnou NaCl a tekutiny na bázi Savo. Tekutiny byly dvojího druhu. Jednak jsem využíval kapalnou formu vedenou pod obchodním názvem Savo original a dále gelovou formu označenou obchodním názvem Savo WC gel.

Na základě dosažených výsledků mohu konstatovat vhodnost použití vodných roztoků všech tří zkoumaných látek. Na případné nejistoty měření jsem upozornil v jednotlivých kapitolách zpracované bakalářské práce.

Uvedený závěr platí i směrem k vyhodnoceným průběhům koncentrace znečištění ve sledovaných profilech fyzikálního modelu. Přesto bych upozornil na určitou obezřetnost při přípravě vodného roztoku Savo WC gel a jeho aplikaci na fyzikální model, neboť je nutné respektovat hustotní poměry proudící vody a aplikovaného vodného roztoku. Vzhledem ke zjištěným skutečnostem lze k této obezřetnosti nabádat i v případě vodného roztoku NaCl.

Za výhodu aplikace vodných roztoků tekutin na bázi Savo lze považovat jejich odeznění z fyzikálního modelu v čase do cca 2 h, což se velmi pozitivně promítá do skutečnosti, že neovlivní experimenty změnou jejich pozadí ani nijak nezatíží čerpací systém včetně fyzikálního modelu. Ovšem i vzhledem k této skutečnosti je třeba upozornit na nutnost realizace krátkodobých experimentů, aby byla zajištěna hodnotová stálost aplikovaného vodného roztoku.

Vodné roztoky kuchyňské soli se při fyzikálním modelování využívají standardně. Jejich nespornou výhodou je jednoznačně identifikovatelná změna elektrické vodivosti měřeného média, nevýhodou potom může být ovlivnění měřených hodnot zvyšováním salinity proudícího média, vyplavování krystalů soli, které mohly ulpět na některých částech zkoumaného fyzikálního modelu a v neposlední řadě i možnost poškození kovových částí čerpacího a měřícího systému korozí.

Uvedené závěry bych však doporučoval ověřit dalšími variantami experimentu. Například bych doporučil změnit koncentraci vodných roztoků látek a variantně zajistit jejich konstantní a proměnný průtok, umístění zdroje simulujícího znečištění na fyzikálním modelu, změnu hodnoty průtoku vody přiváděné na model.

V Brně, 20.5.2018

Ondřej Marek

## 11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ČÁBELKA, J., NOVÁK, P. *Hydrotechnický výzkum I. Modelový výzkum*. SNTL-SVTL, Praha 1964.

HLAVÍNEK, Petr a Jaromír ŘÍHA. *Jakost vody v povodí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2815-5.

JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-512-9.

KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. SNTL/ALFA, Praha 1983.

PAŘÍLKOVÁ, J., RADKOVSKÝ, K. *Manuál k přístroji Z-metr IV. Výstup projektu E!7614*, Brno.

PATOČKA, Michal. *Fyzikální modelování šíření znečištění ve vodních tocích a způsoby jeho monitorování*. Brno, 2006. *Diplomová práce*. VUT v Brně, FAST, Ústav vodních staveb.

ŠEVČÍK, R. *Metrological follow-up of the Z-meter IV*. *EUREKA 2016*, ISSN 2464-4595, ISBN 978-80-214-5338-8, Lednice 2016.

VÝBORA, Pavel. *Úpravy toků*. Brno: VUT, 1978.

ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. SNTL, Praha 1983.

### LEGISLATIVA:

Zákona č. 20/2004 Sb., o vodách.

Nařízení vlády č. 61/2003 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech, ve znění pozdějších předpisů.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů.

### OSTATNÍ ZDROJE

[1] [http://hydro.upol.cz/?page\\_id=47](http://hydro.upol.cz/?page_id=47)

[2] [http://geologie.vsb.cz/geomorfologie/Prednasky/9\\_kapitola.htm](http://geologie.vsb.cz/geomorfologie/Prednasky/9_kapitola.htm)

[3] [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/08-hydrografie.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/08-hydrografie.html)

- [4] <http://www.technoaqua.cz/publikujeme/prednasky/odbery-vzorku-odpadnich-vod/>
- [5] [https://ostrava.idnes.cz/prehrada-komplikace-zdrzeni-nove-herminovy-prelozka-silnice-ptl-/ostrava-zpravy.aspx?c=A170927\\_354538\\_ostrava-zpravy\\_woj](https://ostrava.idnes.cz/prehrada-komplikace-zdrzeni-nove-herminovy-prelozka-silnice-ptl-/ostrava-zpravy.aspx?c=A170927_354538_ostrava-zpravy_woj)
- [6] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN isbn80-200-1004-1.
- [7] PAŘÍLKOVÁ, J., RADKOVSKÝ, K. Manuál Z-metr IV, 2016.
- [8] <https://www.obalove-materialy.cz/kanystr-15-l-s-kohoutkem>

## 12 SEZNAM ZKRATEK A VELIČIN

symbol	název	jednotka
EIS	elektrická impedanční spektrometrie	[-]
VD	vodní dílo	[-]
A	plocha	[m <sup>2</sup> ]
c	koncentrace	[%]
d	průměr	[m]
f	frekvence budicího signálu	[Hz]
G	elektrická vodivost	[S]
I	fázor elektrického proudu	[A]
j	imaginární jednotka	[-]
Q	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
R	elektrický odpor	[Ω]
T	perioda měření	[ms]
t <sub>vz</sub>	teplota vzduchu v laboratoři	[°C]
t <sub>h20</sub>	teplota vody	[°C]
t	čas	[s]
U	amplituda měřicího napětí	[V]
X	reaktance	[Ω]
Z	fázor elektrické impedance	[Ω]
ω	úhlový kmitočet	[rad/s]

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1- Postup při monitorování jakosti vody (Hlavínek a Říha, 2004) ...</i>	19
<i>Obr. 3.2 – Příklad odběru vzorků vody v praxi [4] .....</i>	20
<i>Obr. 4.1 – Pohled na fyzikální model .....</i>	21
<i>Obr. 4.2 – Pohyblivé dno modelu .....</i>	22
<i>Obr. 4.3 - Vizualizace budoucí přehrady Nové Heřminovy [5] .....</i>	22
<i>Obr. 5.1 – Schéma měření elektrické impedance materiálu .....</i>	24
<i>Obr. 6.1 – Detail měřicí elektrody .....</i>	26
<i>Obr. 6.2 – Situace měřících elektrod na fyzikálním modelu vodního toku .</i>	26
<i>Obr. 6.3 – Detail propojení vodičů s měřicí elektrodou .....</i>	27
<i>Obr. 6.4 - Prvky realizace propojení – a) přístrojová svorkovnice, b) konektor CANON, c) krytka konektoru .....</i>	27
<i>Obr. 6.5 - Přístroj Z-metr IV .....</i>	28
<i>Obr. 6.6 - Příslušenství přístroje Z-metr IV – a) kalibrátor, b) adaptér pro měření na jedné dělené sondě .....</i>	29
<i>Obr. 7.1 - Hloubkoměr firmy Mitutoyo .....</i>	32
<i>Obr. 7.2 – Situace měřících sond koncentrace znečištění a sítě bodů pro měření deformace dna .....</i>	33
<i>Obr. 7.3 – Zaměření dna před hydrodynamickým zatížením modelu .....</i>	35
<i>Obr. 7.4 – 3D model dna před hydrodynamickým zatížením .....</i>	35
<i>Obr. 7.5 – Zaměření dna modelu po prvním hydrodynamickém zatížení ..</i>	36
<i>Obr. 7.6 - 3D model dna po prvním hydrodynamickém zatížení .....</i>	36
<i>Obr. 7.7 – Zaměření dna modelu po druhém hydrodynamickém zatížení</i>	37
<i>Obr. 7.8 – 3D model dna po druhém hydrodynamickém zatížení .....</i>	37
<i>Obr. 7.9 – Kalibrace měřicí sondy .....</i>	38
<i>Obr. 7.10 – Umístění barelu na modelu .....</i>	47
<i>Obr. 7.11 – Umístění barelu s plastovou hadičkou na kohoutu .....</i>	48
<i>Obr. 7.12 – Měřicí přístroj THERM 2285-2 .....</i>	49



<i>Obr. 7.13 – Změna hustoty vodného roztoku WC gelu v čase.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7.14 – Vizualizace šíření znečištění vodným roztokem brilantní modří .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 7.15 – Umístění Z-metru IV při měření na modelu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 8.1 – Měřicí sonda 7 nad hladinou vody .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 9.1 – Vizualizace proudění vodným roztokem brilantní modří .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 9.2 – Mapy zbytkových koncentrací simulovaného znečištění.....</i>	<i>74</i>

## 14 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 7.1 – Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku Savo original</i> .....	40
<i>Graf 7.2 – Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku Savo WC gel</i> .....	41
<i>Graf 7.3 – Závislost elektrické vodivosti na koncentraci vodného roztoku kuchyňské soli NaCl do 25%</i> .....	42
<i>Graf 7.4 – Závislost elektrické vodivosti G na koncentraci vodného roztoku Savo original do 25%</i> .....	43
<i>Graf 7.5 – Závislost elektrické vodivosti G na koncentraci vodného roztoku Savo WC gel do 25%</i> .....	44
<i>Graf 7.6 – Kalibrační závislost měřicí sondy č. 1</i> .....	45
<i>Graf 7.7 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po prvním měření – profil 1</i> .....	50
<i>Graf 7.8 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po prvním měření – profil 2</i> .....	50
<i>Graf 7.9 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po druhém měření – profil 1</i> .....	51
<i>Graf 7.10 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po druhém měření – profil 2</i> .....	51
<i>Graf 7.11 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po třetím měření – profil 1</i> .....	52
<i>Graf 7.12 – Průběh hladiny a bodové rychlosti po třetím měření – profil 2</i> .....	52
<i>Graf 7.13 – Časová změna elektrické vodivosti látky savo</i> .....	55
<i>Graf 8.1- Závislosti časové změny elektrické vodivosti vody</i> .....	57
<i>Graf 8.2 – Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava</i> .....	59
<i>Graf 8.3 – Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava</i> .....	60
<i>Graf 8.4 – Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu</i> .....	61

Graf 8.5 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu .....	63
Graf 8.6 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu. Detail předchozího grafu .....	64
Graf 8.7 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava .....	65
Graf 8.8 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu .....	66
Graf 8.9 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Savo WC gelu .....	67
Graf 8.10 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku Sava. Detail předchozího grafu .....	68
Graf 8.11 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku kuchyňské soli NaCl .....	69
Graf 8.12 - Závislosti časové změny elektrické vodivosti roztoku kuchyňské soli NaCl. Detail předchozího grafu .....	70

## 15 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6.1 - Specifikace základních parametrů přístroje Z-metr IV.....</i>	30
<i>Tab. 7.1 – Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené <math>G \cdot 10^{-6} S</math>) .....</i>	40
<i>Tab. 7.2 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené <math>G \cdot 10^{-6} S</math>)</i>	41
<i>Tab. 7.3 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené <math>G \cdot 10^{-6} S</math>)</i>	42
<i>Tab. 7.4 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené <math>G \cdot 10^{-6} S</math>)</i>	43
<i>Tab. 7.5 - Kalibrace měřicích sond metody EIS (jednotka měřené <math>G \cdot 10^{-6} S</math>)</i>	44
<i>Tab. 7.6 – Kalibrační vztahy pro vodné roztoky koncentrace do 100% .....</i>	46
<i>Tab. 7.7 – Kalibrační vztahy pro všechny roztoky koncentrace do 25% .....</i>	46