



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH INDUKČNÍCH MĚŘIDEL PŘI STANOVENÍ PRŮTOKU PLOŠNOU INTEGRAČNÍ METODOU RYCHLOSTNÍHO POLE

THE USE OF ELECTROMAGNETIC CURRENT METER IN THE DISCHARGE MEASUREMENT BY THE
VELOCITY INTEGRATION METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adéla Jechová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodních staveb
Studentka: **Adéla Jechová**
Vedoucí práce: **Ing. Michal Žoužela, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití elektromagnetických indukčních měřidel při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z možností stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou je využití plošné integrační metody rychlostního pole. Tato metoda je založena na plynulém posunu měřidla bodové rychlosti vodního proudu v ploše celého měrného profilu. Metoda je prozkoumána při použití vodoměrných vrtulí. Posouzení možností stanovení průtoku s použitím elektromagnetických indukčních měřidel bodové rychlosti vodního proudu touto metodou však ve větším rozsahu nebylo provedeno. To lze realizovat experimentálně v podmínkách hydraulických tratí vodohospodářské laboratoře.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

- Experimentální měření v laboratoři
- Vyhodnocení měření
- Prezentace dosažených výsledků v tabelární a grafické podobě

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Žoužela, M., Šulc, J., Zubík, P.: Využití integrační metody rychlostního pole pro úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou. Program rozvoje metrologie 2017 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017

[2] Žoužela, M., Zubík, P., Vítů, M.: Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření. Program rozvoje metrologie 2020 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2020

[3] Žoužela, M., Zubík, P., Březina, J., Vítů, M.: Měření bodové rychlosti vodního proudu s využitím elektromagnetických indukčních měřidel. Vodní hospodářství, 11/2021, ISSN 1211-0760, str. 8 – 16. Praha 2021

[4] ČSN EN ISO 748 – Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole s použitím bodových měření. ÚNMZ 2022

[5] ČSN EN ISI 772 – Hydrometrická měření – Terminologie. ÚNMZ 2012

[6] Sýkora, L. Diplomová práce – Zhodnocení integrační metody pro stanovení průměrné rychlosti na svislici v prizmatických korytech, VUT v Brně, 2003

[7] Němeček, P. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, o. s., 2008

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 14. 10. 2022

L. S.

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato experimentální bakalářská práce je zaměřená na využití elektromagnetických indukčních měřidel při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole. Plošná integrační metoda je založena na plynulém posunu měřidla bodové rychlosti vodního proudu v ploše celého měrného profilu. Ta je podrobně popsána v teoretické části práce, která se zabývá metodou rychlostního pole a měřidly, které lze při její aplikaci použít. Součástí práce jsou i nejistoty měření, se kterými se při měření předmětnou metodou je možné setkat. Výsledky naměřené ve vodohospodářské laboratoři jsou zhodnoceny v následujících kapitolách. V závěru práce jsou doporučeny podmínky, které je vhodné při stanovení střední profilové rychlosti elektromagnetickým měřidlem při využití plošné integrační metody dodržet.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické indukční měřidlo, plošná integrační metoda, metoda rychlostního pole, stanovení průtoku, opravný koeficient, nejistota měření, úřední měření průtok

ABSTRACT

This experimental bachelor thesis is focused on the use of electromagnetic current meter in the discharge measurement by the velocity integration method. The velocity integration method is based on the smooth displacement of the current velocity meter in the entire measurement profile. The method is described in detail in the theoretical part of the thesis, which deals with the velocity area method and its measurements. Furthermore, uncertainty of measurement that can be encountered during measurement are listed here. The results measured in the water laboratory are evaluated in the following chapters. At the end of the thesis, the conditions that are suitable to meet when determining the mean profile speed by an electromagnetic current meter using the velocity integration method are recommended.

KEYWORDS

Electromagnetic current meter, velocity integration method, velocity area method, determination of flow, corrective coefficient, uncertainty of measurement, authorised measurements flow

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JECHOVÁ, Adéla. *Využití elektromagnetických indukčních měřidel při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití elektromagnetických indukčních měřidel při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 4. 5. 2023

Adéla Jechová

autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití elektromagnetických indukčních měřidel při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 5. 2023

Adéla Jechová

autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Žouželovi, Ph.D. za odborné vedení, spolupráci při měření a výzkumu, poskytnutí studijních materiálů, cenné rady a trpělivost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	ÚVOD	4
2	JEDNORÁZOVÉ METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU	6
2.1	Přehled metod terénního měření.....	6
2.2	Úřední měření.....	7
2.3	Metoda rychlostního pole.....	7
2.3.1	Princip metody rychlostního pole.....	7
2.3.2	Měřidla bodové rychlosti proudění vody.....	8
2.3.3	Klasická metody rychlostního pole.....	12
2.3.4	Plošná integrační metody rychlostního pole.....	13
3	MOTIVACE A CÍLE VÝZKUMU	17
4	NEJISTOTA MĚŘENÍ	18
4.1	Standardní nejistota stanovená způsobem A.....	19
4.2	Standardní nejistota stanovená způsobem B.....	21
4.2.1	Rozdělení zdrojů nejistot stanovených způsobem B	21
4.2.2	Postup určení standardní nejistoty stanovené způsobem B	22
4.3	Výpočet celkové nejistoty pomocí relativních dílčích nejistot	23
5	NEJISTOTA MĚŘENÍ PŘI UŽITÍ PLOŠNÉ INTEGRAČNÍ METODY	25
5.1	Nejistota stanovená způsobem A při měření průtoku integrační metodou.....	26
5.1.1	Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu - p_{AB}	26
5.1.2	Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky - p_{ah}	27
5.1.3	Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení kalibračních konstat EMI měřidla - p_{Ac}	27
5.1.4	Nejistota určená metodou A ve stanovení bodové rychlosti proudu - p_{Au}	27
5.2	Nejistota stanovená způsobem B při měření průtoku integrační metodou.....	28
5.2.1	Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu - p_{BB}	29
5.2.2	Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky - p_{Bh}	29

5.2.3	Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační závislosti měřidla rychlosti vodního proudu - p_{BC}	29
5.2.4	Nejistota stanovená způsobem B při určení opravného koeficientu - p_{Bk}	29
6	POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ	30
6.1	POUŽITÉ EMI MĚŘIDLO	30
6.2	Hydraulické okruhy Laboratoře.....	31
6.2.1	Hydraulický okruh č.1	31
6.2.2	Hydraulický okruh č. 2.....	32
6.3	Hydraulické žlaby	33
6.3.1	Žlab 100.....	33
6.3.2	Žlab 40.....	35
6.4	Postup měření.....	37
6.5	Vyhodnocení měření	41
6.5.1	Stanovení hodnot sledovaných veličin měření.....	43
7	VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU	47
7.1	Opravný koeficient k – žlab 40	47
7.2	Opravný koeficient k – žlab 100	50
7.3	celkové výsledky Opravného koeficientu k.....	52
8	VYHODNOCENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘI APLIKACI PLOŠNÉ INTEGRAČNÍ METODY	57
8.1	Vyhodnocení vlivu nejistoty reprodukovatelnosti kalibračních konstant EMI měřidla p_{Ac} a nejistoty ve stanovení bodové rychlosti proudu p_{Au}	57
8.2	Vyhodnocení nejistoty opravného koeficientu k.....	59
8.3	Bilanční zhodnocení jednotlivých zdrojů celkové nejistoty průtoku stanoveného plošnou integrační metodou.....	60
9	ZÁVĚR	62
10	POUŽITÁ LITERATURA.....	63

11	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	65
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	68

1 ÚVOD

Stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou je ve vodním hospodářství jedním ze zásadních úkonů. Znalost velikosti průtoku, resp. střední profilové rychlosti, je důležitým faktorem pro navrhování vodohospodářských staveb. Profily s volnou hladinou obecně reprezentují vodní toky, zavlažovací a odvodňovací kanály, stokové sítě, otevřené náhony či přivaděče k vodním elektrárnám.

Obvykle se k měření bodové rychlosti proudu používají vodoměrné vrtule s rotačním prvkem. Ty jsou v současné době jediným měřidlem schváleným metrologickým předpisem MP 010 [3] k autorizovanému úřednímu měření průtoku v profilech s volnou hladinou při použití plošné integrační metody. S rozvojem průmyslu a obecně s velkou modernizací technologií dochází k rozvoji i v této oblasti. Dochází k modernizaci nejen vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem, ale i měřidel pracujících na odlišných principech.

Mezi měřidla pracujících na odlišných principech lze zařadit například ultrazvuková nebo elektromagnetická indukční měřidla. Elektromagnetická indukční měřidla mají oproti vodoměrným vrtulím s rotačním prvkem některé praktické výhody. Jedná se například o měření prováděné v profilech stokových sítí se silně znečištěnou odpadní vodou obsahující látky, které by způsobily zanesení propeleru vodoměrné vrtule a znemožnily by správnost měření.

Elektromagnetická indukční měřidla jsou pro měření bodových rychlostí hojně využívána a schválena MP 010 [3] pro úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou, avšak nelze je použít pro úřední měření při využití plošné integrační metody. Při měření plošnou integrační metodou je určena přímo střední profilová rychlost, čímž se doba zpracování výsledků měření oproti klasickému přístupu výrazně zkrátí. Proto je snahou této práce získat potřebné informace a umožnit tak využití těchto měřidel při měření i plošnou integrační metodou.

Bakalářská práce byla zpracována v souvislosti s řešením úkolu Programu rozvoje metrologie 2022 Úřadu pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. [7]

Bakalářská práce je koncipována tak, že je rozdělena do tří částí. První část teoreticky přibližuje jednorázové metody měření průtoku kapalin s volnou hladinou a používaná měřidla. Dále jsou zde uvedeny nejistoty měření, které s měřením

neoddělitelně souvisí. V další části práce je popsán postup experimentálního výzkumu, je zde uveden popis použitého měřidla, popis hydraulických okruhů a žlabů, na kterých byl výzkum proveden. Třetí část se zabývá vyhodnocením výsledků měření. Nejdříve jsou zhodnoceny výsledky pro žlab 40, poté pro žlab 100 a nakonec jsou pro lepší představu výsledky z obou žlabů sloučeny a vyhodnoceny společně. Poté jsou v třetí části vyhodnoceny nejistoty měření.

2 JEDNORÁZOVÉ METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

Následující kapitoly se zabývají přehledem jednorázových (terénních) metod měření průtoku, jejich principy a měřidla, které pro ně lze v praxi využít. Nachází se zde kapitola zabývající se definicí úředního měření. Protože tématem bakalářské práce je využití plošné integrační metody pomocí EMI měřidla, je zde podrobně popsána pouze metoda rychlostního pole.

2.1 PŘEHLED METOD TERÉNNÍHO MĚŘENÍ

Metody jednorázového měření průtoku kapalin v profilech s volnou hladinou lze metodicky rozdělit do dvou základních kategorií – jednorázové metody měření průtoku a z nich používané vybrané metody úředního měření průtoku v profilech s volnou hladinou.

Mezi metody jednorázového terénního měření průtoku patří:

- objemová metoda (metoda jímání vody do odměrné nádoby);
- vážící metoda (metoda jímání vody do vážícího vaku);
- metoda rychlostního pole;
- využití měrných přelivů a žlabů;
- využití přenosné soupravy s průtokoměrem;
- laserová anemometrie;
- směšovací metoda – stopovače;
- kombinace uvedených metod.

Dle metrologického předpisu MP 010 [3] je možné provádět úřední měření (definice úředního měření viz kapitola 2.2) pomocí těchto metod:

- metoda rychlostního pole;
- objemová metoda (metoda jímání vody do odměrné nádoby);
- vážící metoda (metoda jímání vody do vážícího vaku);
- využitím přenosné měřicí sestavy s průtokoměrem;
- využitím měrných přelivů a žlabů.

2.2 ÚŘEDNÍ MĚŘENÍ

Úřední měření je ve smyslu zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů definováno jako metrologický výkon, o jehož výsledku vydává autorizovaný subjekt doklad, který má charakter veřejné listiny. Jeho náležitosti stanoví ministerstvo vyhláškou. Podmínkami výkonu je používání měřidel, u nichž je zajištěna metrologická návaznost, certifikát odborné způsobilosti úředního měřiče vydaný akreditovanou osobou nebo osvědčení o odborné způsobilosti vydané Úřadem a dohled prováděný Českým metrologickým institutem. [1]

Metrologický předpis MP 010 [3] je dokument, kde jsou sepsány postupy pro provádění úředního měření průtoku v profilech s volnou hladinou. Jedná se o dokument, který je závazný pro pracovníky subjektů autorizovaných k úřednímu měření průtoku. V předpisu lze nalézt všechny relevantní informace, které jsou potřebné pro výkon předmětného úředního měření průtoku.

2.3 METODA RYCHLOSTNÍHO POLE

V následující kapitole bude popsán princip a využití metody rychlostního pole s využitím měřidel bodové rychlosti proudění vody. Měření pomocí této metody musí být v souladu s normou ČSN EN ISO 748 [2]. Metoda rychlostního pole se využívá jak v systémech tlakových, tak hojně i v systémech s volnou hladinou.

Metoda rychlostního pole je používána pro stanovení průtoku při užití EMI měřidel nebo vodoměrných vrtulí. Z tohoto důvodu je jí jako jediné věnována větší pozornost a bude v dalších kapitolách detailně popsána.

2.3.1 PRINCIP METODY RYCHLOSTNÍHO POLE

Metoda rychlostního pole stanovuje průtok pomocí integrace rychlostního pole přes plochu průtočného průřezu. Průtok ve smyslu [5] se stanovuje pomocí rovnice:

$$Q = \int_S f(u) dx dy; \quad (2.1)$$

kde

$f(u)$ – funkce rychlostního pole.

Funkce rychlostního pole je neznámá, a z tohoto důvodu je nutné ji nahradit jiným vhodným způsobem. Obvykle se používá vhodné rozmístění měrných bodů v průtočném profilu, ve kterých se změří bodové rychlosti. Tyto rychlosti jsou následně aproximovány vhodnou matematickou funkcí. [5]

2.3.2 MĚŘIDLA BODOVÉ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VODY

Pro měření bodové rychlosti vodního proudu je možné použít celou řadu měřících přístrojů. Z normy [2] vyplývá, že pro měření bodových rychlostí je možné použít vodoměrné vrtule, EMI měřidla nebo ultrazvuková měřidla. V následujících podkapitolách budou popsány vodoměrné vrtule, EMI měřidla a měřidla ultrazvuková. Ta budou popsána jen okrajově, protože MP 010 [3] připouští pro úřední měření použití pouze vodoměrné vrtule a EMI měřidla.

2.3.2.1 Vodoměrná vrtule

Pro měření rychlosti lze použít vodoměrnou vrtuli, jejíž rotační prvek (rotor) se označuje jako propeler. Při měření je nutné zaznamenávat počet otáček propeleru a dobu měření. Každá vodoměrná vrtule (propeler) je charakterizována konstantami, které jsou uvedené v jejím kalibračním listu. Tyto konstanty vstupují do vztahu pro výpočet bodové rychlosti proudu. Bodovou rychlost lze stanovit ze vztahu:

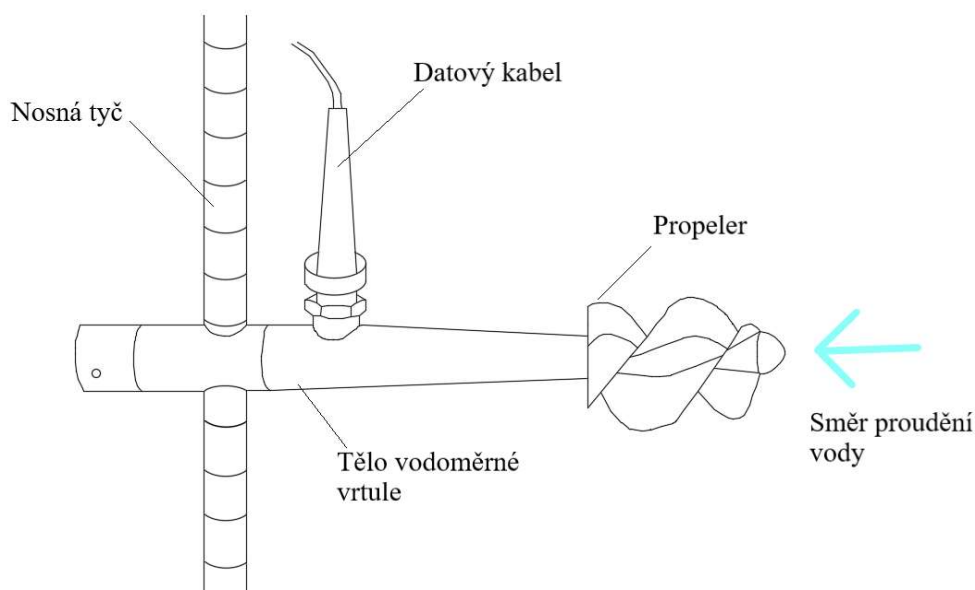
$$v = \alpha + \beta \cdot n ; \quad (2.2)$$

kde

α, β - kalibrační konstanty vodoměrné vrtule;

n - frekvence otáčení propeleru.

Vodoměrná vrtule propelerového typu se obvykle skládá z propeleru, těla vrtule, datového kabelu. Pro snadnější manipulaci se upevňuje na nosnou tyč. Sestava vodoměrné vrtule viz obr. 2.1.

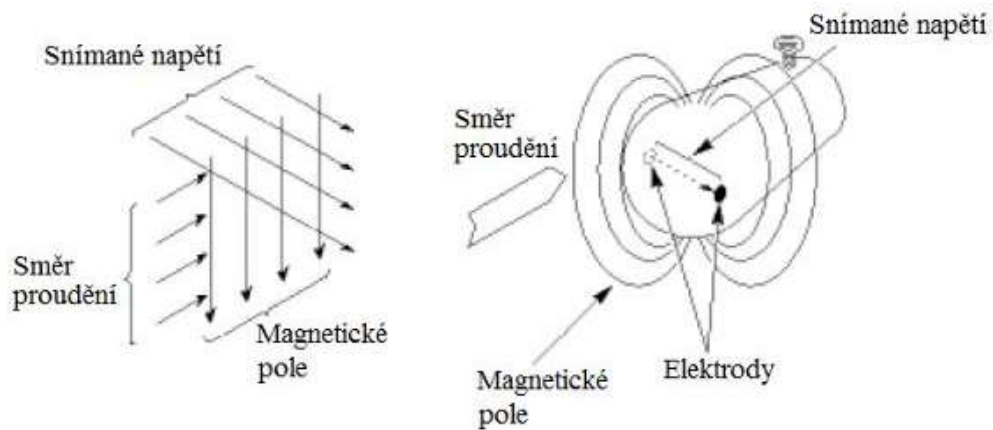


Obr. 2.1 Vodoměrná vrtule

Při použití vodoměrné vrtule je přesnost měření závislá na mnoha faktorech. Jedná se například o typ vodoměrné vrtule, absolutní hodnotu měřené rychlosti, dobu měření v měrném bodě, intenzitu turbulence proudu, pozici vodoměrné vrtuli vzhledem k natékajícímu proudu. Všechny ovlivňující faktory a pravidla použití jsou podrobně popsány v [1,2,3].

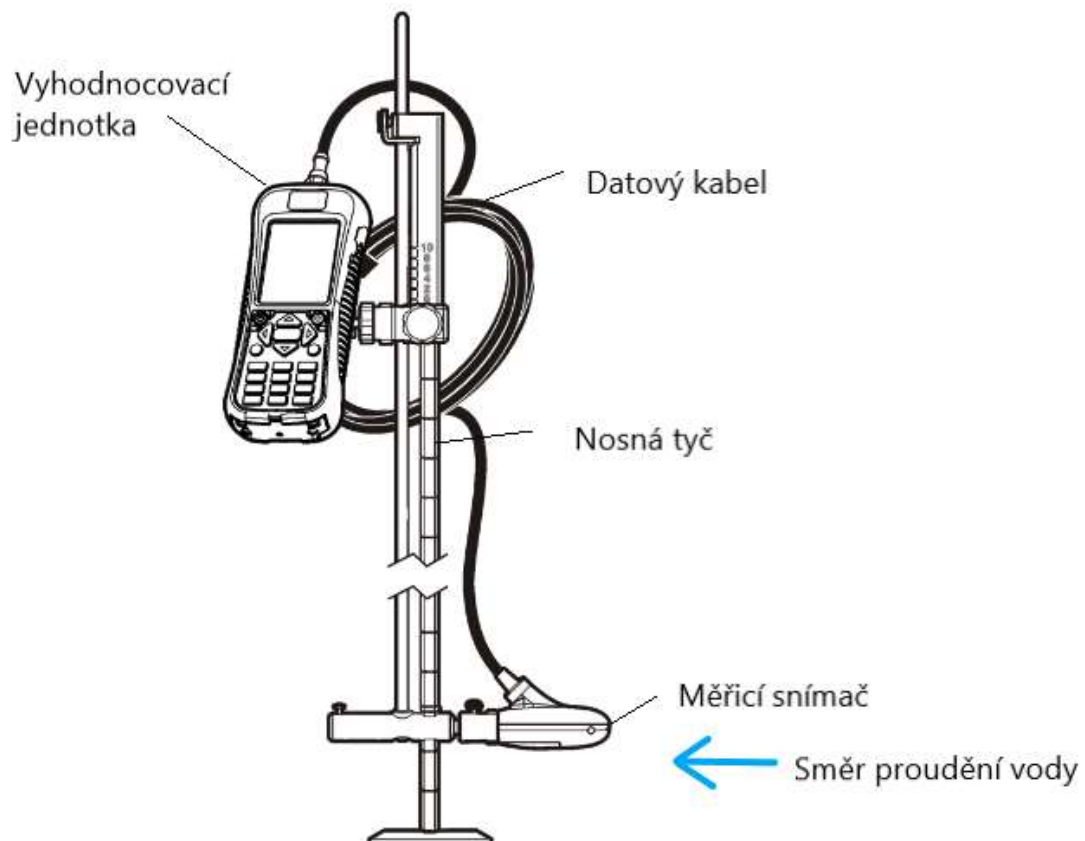
2.3.2.2 Elektromagnetické indukční (EMI) měřidlo

Měření rychlosti pomocí EMI měřidla je založeno na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukci. Na koncích elektrického vodiče pohybujícího se v magnetickém poli dochází k vytváření elektrického napětí. Velikost tohoto napětí je přímo úměrná rychlosti, kterou se elektrický vodič v tomto poli pohybuje. Schéma principu měření je zobrazeno na obr. 2.2. V praxi je měřicí snímač vybaven elektromagnetickou cívkou, která vytváří elektromagnetické pole. Dále je vybaven dvojicí uhlíkových elektrod, které následně měří napětí indukované rychlostí elektrického vodiče, v našem případě se jedná o proudící vodu. Pomocí vyhodnocovací jednotky zařízení je naměřené napětí zpracováno a převedeno na rychlost. [6]



Obr. 2.2 Schéma principu měření rychlosti proudu [5]

Přenosné EMI měřidlo se obvykle skládá z vyhodnocovací jednotky, datového kabelu a měřicího snímače. Měřicí snímač lze pomocí nosné tyče umísťovat na konkrétní místa měrného profilu, musí být připojen datovým kabelem k vyhodnocovací jednotce, která zajišťuje i elektrické napájení celé měřicí sestavy viz obr. 2.3. [10]



Obr. 2.3 Sestava EMI měřidla [10]

Před použitím EMI měřidla musí dojít ke kalibraci celé sestavy v kalibrační laboratoři. Je nutné kalibrovat celou soustavu EMI měřidla (snímač, kabel, jednotka) společně. Není možné kombinovat různé prvky z několika měřících sestav bez dodatečného metrologického navázání.

Při použití EMI měřidel je nutné zjistit, zda je voda, ve které měříme, vodivá. Je to jeden z důležitých parametrů pro jejich správné fungování. Minimální hodnotu měrné vodivosti musí udávat výrobce v technickém listu. Např. výrobce OTT HydroMet – námi použitého EMI měřidla udává hodnotu kolem 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mechanicky předčištěná odpadní voda má vodivost 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pitná voda v rozmezí mezi (200–400) $\mu\text{S}/\text{cm}$. Destilovaná voda má měrnou elektrickou vodivost (0,5 – 3,0) $\mu\text{S}/\text{cm}$, a proto je obtížné či nemožné v ní tímto měřidlem měřit. [11]

Pokud se měrný profil nachází v okolí objektů, které vytvářejí silné elektromagnetické pole, může dojít k ovlivnění naměřených hodnot nebo k elektrickému rušení. [6]

2.3.2.2 Ultrazvuková měřidla

Ultrazvuková měřidla vyhodnocují objemový průtok na základě měření rychlosti proudícího média a znalosti průtočného průřezu. K měření rychlosti se využívá ultrazvukový signál šířící se v proudícím médiu. [14]

Lze je rozdělit podle způsobu vyhodnocení ultrazvukového signálu na:

- měřidla s vyhodnocováním doby průchodu signálu (transit – time)
- měřidla využívající Dopplerův jev.

Měřidla s vyhodnocením doby průchodu signálu.

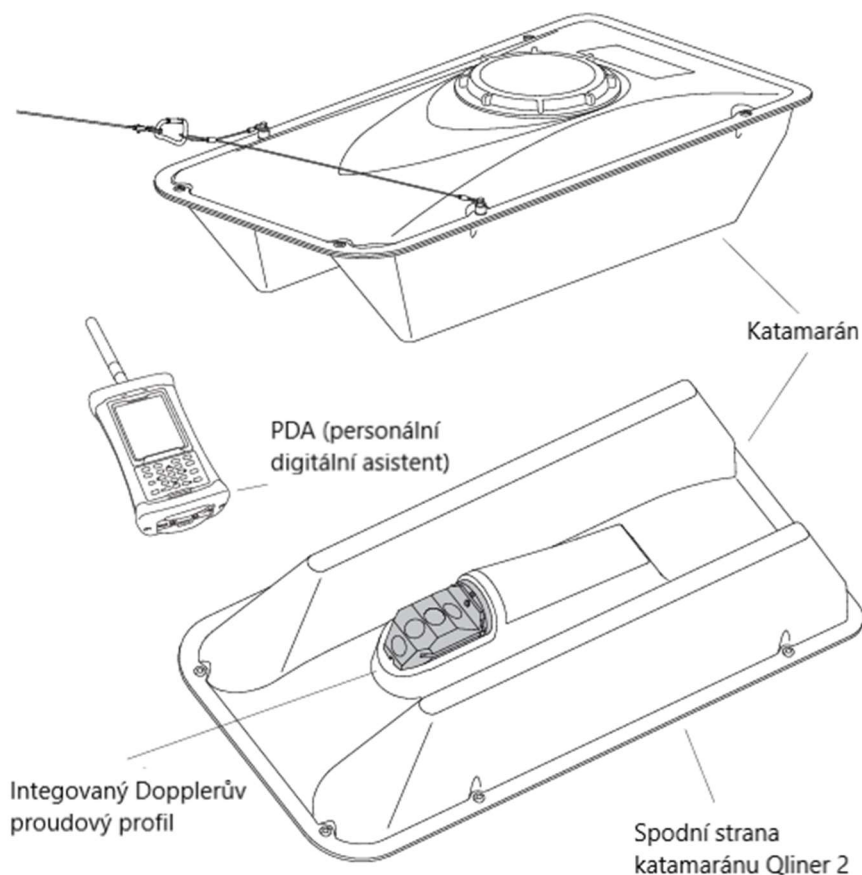
Jejich základem je vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění, nejčastěji se jedná o piezoelektrické měniče. Ty mohou pracovat jako vysílače nebo přijímače ultrazvukového signálu. Frekvence vlnění je závislá na rezonanční frekvenci měniče, ta bývá obvykle kolem (0,5 až 1) MHz.

Měřidla využívající Dopplerův jev.

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence v závislosti na vlnové délce přijímaného signálu oproti signálu vysílanému. To je způsobeno nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Měřidla založená na tomto jevu, lze použít v případě, že proudící

médium obsahuje částice, které odrážejí zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny plynu v kapalině.

Příkladem měřidla využívající k měření průtoku Dopplerův jev je měřidlo od firmy OTT- Qliner 2. To je ukázáno na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Mobilní systém měření průtoku OTT Qliner 2 [12]

2.3.3 KLASICKÁ METODA RYCHLOSTNÍHO POLE

Klasická metoda rychlostního pole spočívá v získání hodnot bodových rychlostí proudu měřením v několika bodech v každé svislici mezi dnem a hladinou měrného profilu tak, jak je naznačené na obr. 2.5. Z jednotlivých bodových rychlostí změřených na svislicích se následně stanoví průřezová rychlost. Výsledný průtok se stanoví dle vztahu:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot \bar{v}_i \quad (2.3)$$

kde

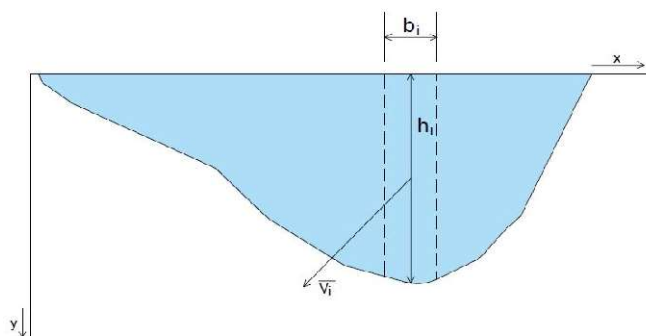
Q – hodnota průtoku;

b_i – šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu;

h_i – hloubka svislicového nebo mezisvislicového pásu;

\bar{v}_i – průměrná rychlost na měrné svislici;

m – počet svislicových nebo mezisvislicových pásů.



Obr. 2.5 Definiční schéma metody rychlostního pole

Množství měrných bodů a jejich rozmístění závisí na celé řadě faktorů [5]. Mezi ně patří:

- šířka a hloubka měrného profilu;
- deformace rychlostního pole;
- podmínky dna v měrném profilu a charakter profilu protiproudě před profilem;
- dostupnost v čase (limitní doba určená pro měření);
- požadovaný stupeň přesnosti;
- použité vybavení.

Minimální počet bodů na svislici jsou 2 body, obecně se ale doporučuje volit co nejvyšší počet bodů měření. [5]

2.3.4 PLOŠNÁ INTEGRAČNÍ METODA RYCHLOSTNÍHO POLE

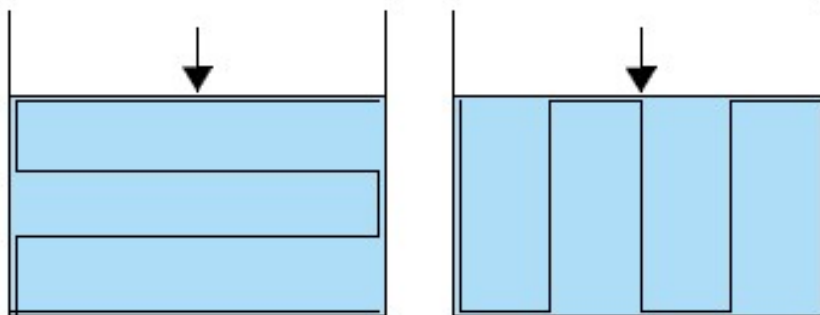
Plošnou integrační metodu rychlostního pole je možné použít u měrného profilu, ke kterému je např. obtížný přístup nebo spíše častěji když je limitní doba pro provedení měření relativně krátká. Tato metoda umožňuje stanovit průtok dostatečně přesně i v relativně krátkém časovém intervalu. [5,8]

Plošnou integrační metodu lze použít pro přímé stanovení střední profilové rychlosti. [5]

V současné době je možné dle [3] provádět úřední měření s využitím plošné integrační metody pouze vodoměrnou vrtulí. Proto je snahou této bakalářské práce zjistit, zda je EMI měřidlo vhodné použít k úřednímu měření, popřípadě za jakých podmínek.

Pro stanovení střední profilové rychlosti se pohybuje daným měřidlem (vodoměrnou vrtulí) po zvolené dráze tak, aby postihla celou plochu měrného profilu. Na volbě způsobu posunu hraje roli tvar průřezu, předpokládaná deformace rychlostního pole a také požadovaná přesnost a zkušenosti měřiče. V prizmatických korytech lze volit dvojí způsob posunu – posun po horizontálách nebo posun po vertikálách; schéma pojezdu je patrné z obr. 2.6. Počet horizontál či vertikál je závislý na velikosti průřezu a požadované přesnosti měření, avšak minimální počet horizontál uvedený v MP 010 [3] jsou dvě horizontály. Při měření nesmí rychlost rovnoměrného posunu překročit hodnotu 2 m/min, zároveň musí být doba měření v profilu minimálně 60 sekund. Pouze v případě, že rychlost měřené kapaliny je větší než 0,5 m/s, je možné měřit kratší dobu, avšak alespoň 30 sekund. [3,5]

Každé měření je nutné provádět minimálně třikrát. [3]



Obr. 2.6 Schéma pojezdu – po horizontálách, po vertikálách

Výpočet průtoku se následně provádí pomocí rovnice kontinuity:

$$Q = S \cdot v ; \quad (2.4)$$

kde

S – plocha průtočného průřezu;

v – profilová rychlost.

2.3.4.1 Opravný koeficient k

Při použití plošné integrační metody je nutné počítat s tím, že skutečné rozložení rychlostí u stěn měrného profilu není zcela možné uvedeným postupem změřit a vyhodnotit. Z tohoto důvodu dochází k tomu, že rychlosti stanovené touto metodou vycházejí téměř vždy vyšší než je skutečná střední profilová rychlost. Proto je nutné zavést koeficient k , který zohledňuje existenci rychlostního gradientu v přístěnné oblasti měrného profilu. Za pomoci koeficientu k lze střední profilovou rychlost získat ze vztahu:

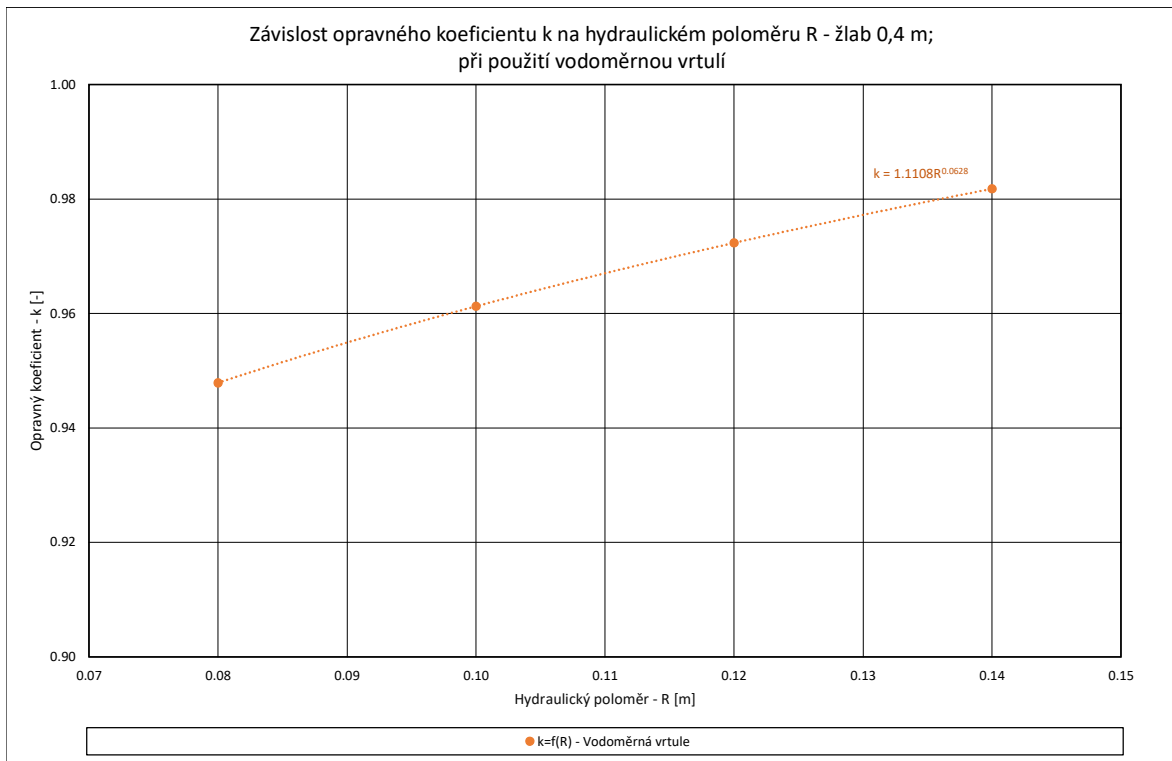
$$v = k \cdot v_{int} \quad (2.5)$$

kde

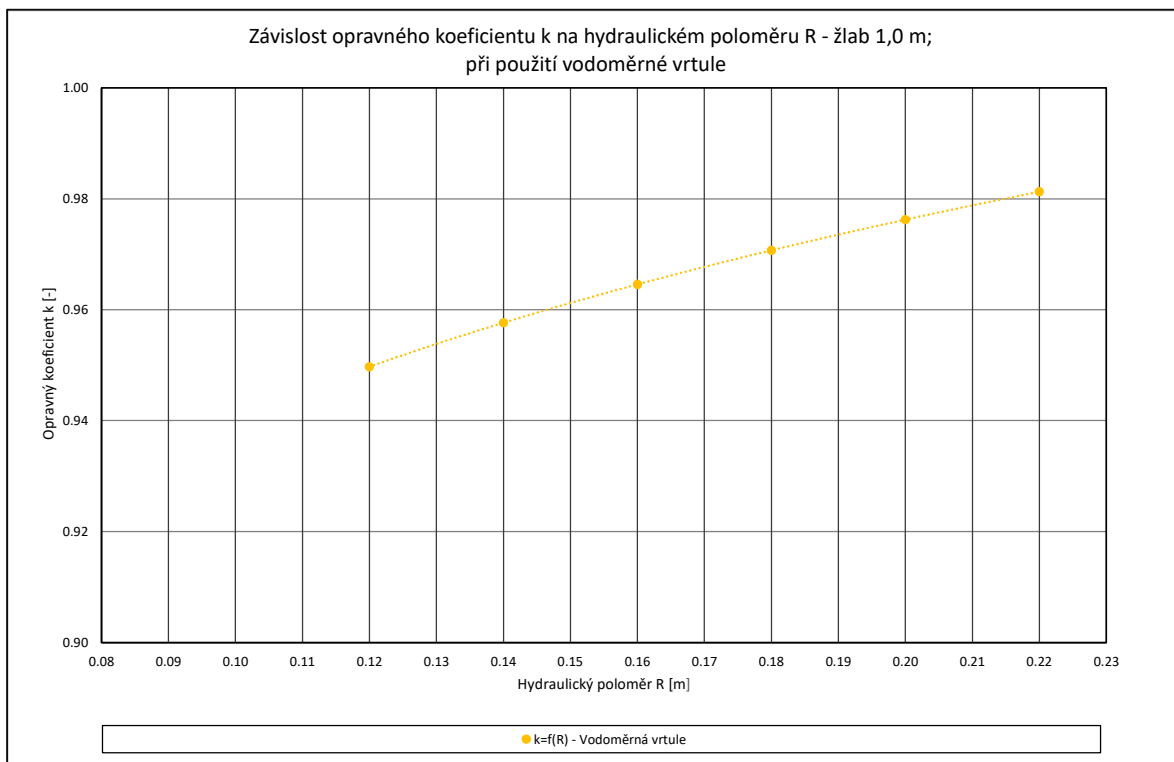
v – střední profilová rychlost;

v_{int} - rychlost stanovená integrační metodou.

Pro získání hodnoty koeficientu je nutné provést náročné experimentální zkoušky v definovaných podmínkách se znalostí skutečné hodnoty měřeného průtoku. Z údajů, které jsou k dispozici z diplomové práce [9] a výzkumných prací PRM 2017 [5] zabývajících se problematikou vodoměrných vrtulí, bylo zjištěno, že opravný koeficient k pro vodoměrné vrtule je nejvíce závislý na geometrických charakteristikách měrného profilu, nejvíce na hydraulickém poloměru. Z naměřených hodnot v diplomové práci [9] a výzkumných prací Plánu rozvoje metrologie (dále jen PRM) z roku 2017 [5] vyplývá, že hodnoty opravného koeficientu k pro vodoměrné vrtule jsou při měření ve dvou horizontálách vyšší než při měření ve třech horizontálách. Výsledky ze zmíněných dokumentů pro opravný koeficient k při použití vodoměrných vrtulí jsou uvedeny na obr. 2.7 a 2.8. Grafy jsou sestrojeny pro dvě i tři horizontály společně. Koeficient k by neměl u obvyklých deformací rychlostních polí překročit hodnotu 1.[5,8,9]



Obr. 2.7 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 40, při použití vodoměrné vrtule



Obr. 2.8 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 100, při použití vodoměrné vrtule

3 MOTIVACE A CÍLE VÝZKUMU

Úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou lze v současné době provádět s využitím plošné integrační metody dle metrologického předpisu MP 010 [3] pouze vodoměrnou vrtulí s rotačním prvkem. S rozvojem průmyslu a technologií v oblasti měření průtoku je nutné na tyto okolnosti reagovat a validovat pro měření i jiná moderní měřidla. Elektromagnetická indukční měřidla se používají pro měření průtoků v otevřených korytech již několik let. V současné době je možné použít EMI měřidla k úřednímu měření pouze při aplikaci bodové metody rychlostního pole. Motivací výzkumu je zjištění, zda jsou elektromagnetická indukční měřidla vhodná pro úřední měření při využití plošné integrační metody, případně za jakých podmínek.

Experimentální výzkum má následující cíle:

- posouzení použitelnosti EMI měřidel pro měření bodové rychlosti vodního proudu při aplikaci plošné integrační metody rychlostního pole v prizmatických kanálech s šířkami 0,4 m a 1,0 m;
- návrh pracovního postupu provádění integračního měření ručním způsobem;
- nalezení hodnot opravného koeficientu k a jeho následnou aplikaci při výpočtu nejistot měření.

V rámci výzkumu byly všechny tyto cíle řešeny a v dalších kapitolách podrobně zhodnoceny.

Experimentální práce probíhaly v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Konkrétně byl výzkum proveden na dvou měrných hydraulických žlabech o šířce 0,4 m a 1,0 m, s rychlostmi od 0,1 m/s do 0,5 m/s, a to při hloubkách od 0,1 m do 0,4 m.

4 NEJISTOTA MĚŘENÍ

Nejistota měření je pojem, který je zaveden v metrologii pro určení přesnosti provedeného měření. Podstata nejistoty měření je statistické zpracování naměřených hodnot. Výsledkem těchto hodnot je interval. Jedná se o interval v okolí výsledku měření, ve kterém se s určitou pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota měřené veličiny. [4]

Standardní nejistota je charakterizována jako základní nejistota, lze ji značit jako u . Je možné ji vyjádřit jako absolutní standardní nejistotu nebo relativní standardní nejistotu. Absolutní standardní nejistota je vyjádřena ve stejných jednotkách jako je měřená veličina. Relativní standardní nejistota je poměr mezi absolutní standardní nejistotou a hodnotou příslušné měřené veličiny. Jedná se tedy o bezrozměrnou veličinu, kterou lze po vynásobení stem vyjádřit v procentech.

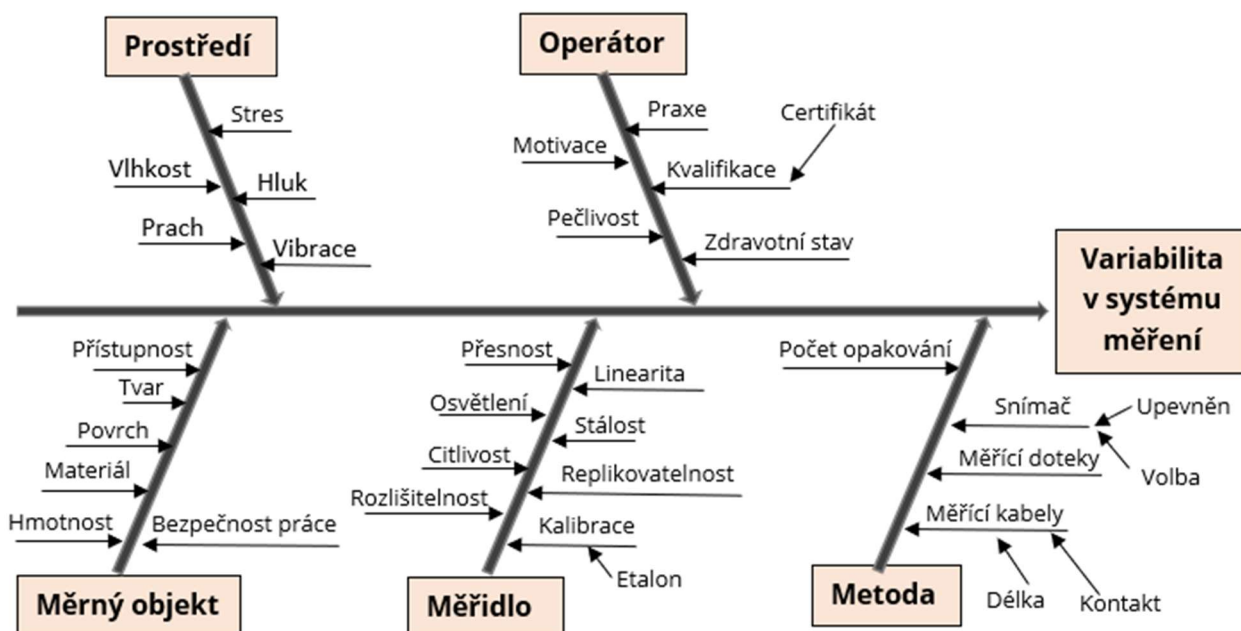
Standardní nejistotu lze rozdělit dle způsobu určení na:

- standardní nejistotu stanovenou způsobem A;
- standardní nejistotu stanovenou způsobem B.

Z těchto základních dvou typů nejistot můžeme ještě stanovit:

- standardní kombinovanou nejistotu (sloučení nejistot stanovených způsobem A a B);
- rozšířenou nejistotu [4].

Nejistoty, které zapříčiní kolísání naměřených hodnot lze vyhodnotit metodu A z opakovaných měření. V případě, že nemáme opakovaná měření k popisu naměřené veličiny, použijeme k vyhodnocení standardní nejistoty metodu B. Určité zdroje nejistot způsobují variabilitu v systému měření. Příklady těchto zdrojů nejistot lze vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Diagram příčin a následků pro variabilitu v systému měření [4]

4.1 STANDARDNÍ NEJISTOTA STANOVENÁ ZPŮSOBEM A

Standardní nejistotu stanovenou způsobem A je možné statisticky stanovit pouze v případě, že máme k dispozici opakovaná měření parametru. A to za předpokladu, opakované měření probíhalo ve stejných podmínkách a vzájemné nezávislosti jednotlivých měření. Standardní nejistotu stanovenou způsobem A lze obecně označit jako u_A . Při výpočtu postupujeme tak, že jako první určíme výběrový průměr jednotlivých měření. Ten se určí podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

kde

n - počet měření parametru x ;

i - i -tá hodnota měřeného parametru x .

Dalším krokem je výpočet směrodatné odchylky výběrového průměru \bar{x} . Ta představuje rozptýlení hodnot výběrového průměru. Lze ji stanovit ze vztahu:

$$s_{\bar{x}} = u_{AX} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.2)$$

V případě, že počet opakování měření je menší než 10, lze odhadnout hodnotu u_{AX} , za předpokladu, že data pocházejí z normálního rozdělení následovně:

$$u_A = k_{UA} \frac{s_{xi}}{\sqrt{n}}; \quad (4.3)$$

kde

k_{UA} – bezpečnostní faktor, jeho hodnoty dle počtu opakování jsou v tab. 4.1;

s_{xi} - směrodatná odchylka z opakovaných měřených hodnot;

n - počet opakování měření.

Tab. 4.1 Hodnoty bezpečnostního faktoru v závislosti na počtu měření [4]

BEZPEČNOSTNÍ FAKTOR pro určení u_A v případě $n < 10$									
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a více
k_{ua}	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

Hodnota bezpečnostního faktoru slouží jako pojistka při nedostatečném množství důkazů, že nepříliš četné výběry naměřených hodnot respektují normální rozdělení. Hodnota bezpečnostního faktoru se se zmenšujícím počtem opakování zvětšuje, proto se doporučuje používat 10 a více opakování. [4]

Uvažujme – li, že máme funkci Y , kterou lze označit jako funkci nezávislých parametrů X_1, X_2, \dots, X_m , a lze ji zapsat jako vztah:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m); \quad (4.4)$$

Je možné potom stanovit standardní nejistotu stanovenou způsobem A této funkce pomocí Gaussova zákona šíření chyb, jehož tvar lze zapsat následovně:

$$u_{AY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} S_{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} S_{\bar{x}_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_j} S_{\bar{x}_j}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} S_{\bar{x}_m}\right)^2}; \quad (4.5)$$

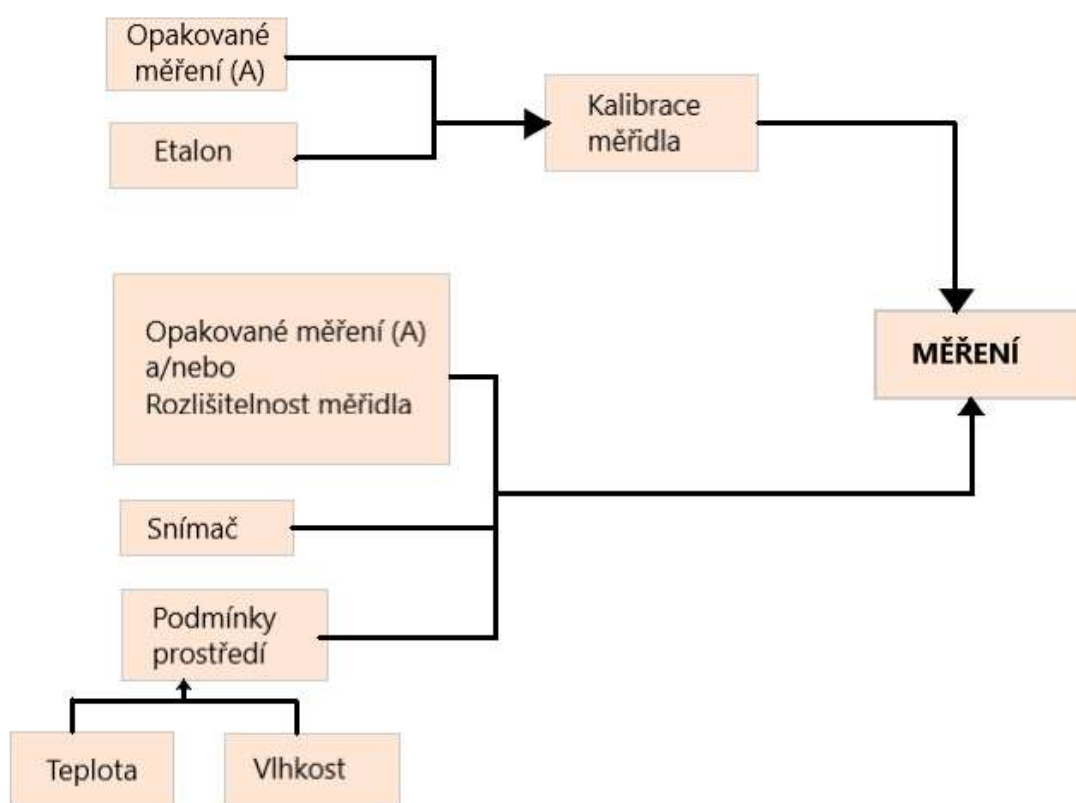
kde

$S_{\bar{x}_1}$ – směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X_j ;

$\frac{\partial Y}{\partial X_i}$ – parciální derivace funkce Y podle parametru X_j .

4.2 STANDARDNÍ NEJISTOTA STANOVENÁ ZPŮSOBEM B

Obecně je možné standardní nejistotu stanovenou způsobem B označit jako u_B . Jedná se o nejistoty, u kterých nejsou potřebná opakovaná měření, abychom zjistili jejich konkrétní příčiny, statistické chování a velikost variability. Zdroje těchto nejistot se určují nestatistickými metodami, jejich počet závisí na rozhodnutí operátora (konkrétně na jeho rozboru systému měření). Pro zdroje nejistoty také platí, že jejich vliv není možné snížit opakovanými měřeními. Formálně se zdroje těchto vlastností označují jako zdroje typu B. Ve většině případů se velikost tohoto zdroje přebírá z technických dokumentací. Technickou dokumentací se rozumí certifikáty, kalibrační listy, ověřovací listy, technické normy, údaje výrobců použitých měřidel, technické tabulky, typová osvědčení apod. [4]



Obr. 4.2 Schéma zdrojů nejistot měření [4]

4.2.1 Rozdělení zdrojů nejistot stanovených způsobem B

Při určení standardní nejistoty stanovenou způsobem B je kladen důraz na to, aby při určování nedocházelo k opakování jednotlivých zdrojů nejistot. Rozlišitelnost měřidla může být v tomto případě problematickým zdrojem. Je proto vhodné připravit

si pro konkrétní případy schéma zdrojů. Schéma zdroje roztřídí, ukáže, v jaké souvislosti je zdroj řešen a nedovolí, aby se některý zdroj v systému výpočtu opakoval. Ukázka takového rozboru je na obr. 4.2.

Počet zdrojů, který by byl optimální, není jednoznačně určen. Lze ale využít obecné poučky, která udává, že pokud je zdroj, jehož standardní nejistota stanovená způsobem B je menší než šestina největšího zdroje z této skupiny $u_{B\ MAX}$, je možné tento zdroj považovat za bezvýznamný. Tuto nerovnost lze zapsat [4]:

$$u_{Bi} < \frac{u_{B\ MAX}}{6}. \quad (4.6)$$

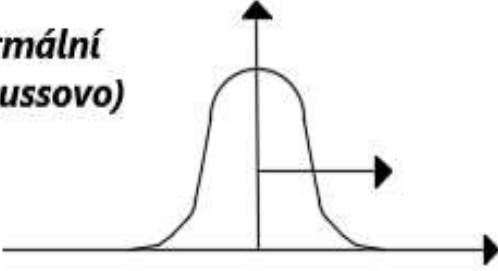
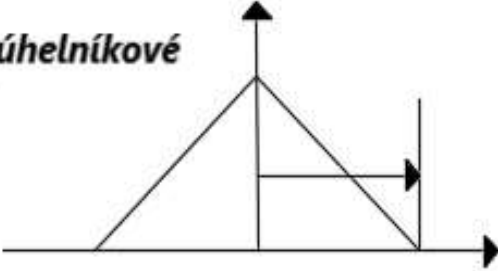
4.2.2 Postup určení standardní nejistoty stanovené způsobem B

Nejistoty stanovené způsobem B je možné vypočítat trojím způsobem, a to z již známé rozšířené nejistoty na kombinovanou nejistotu, odhadem z variability zdroje a statistického rozdělení anebo ze známých údajů o kombinované nejistotě, které nalezneme v certifikátech, tabulkách, literárních zdrojích apod. [4]

V případě, že hodnotu nejistoty odhadujeme je nutné postupovat podle následujících kroků:

- odhad rozsahu změn odchylek $\pm z_{Xmax}$ od parametru X tak, že pravděpodobnost překročení těchto je velmi malá;
- posouzení průběhu pravděpodobnosti odchylek k odhadnutému intervalu a určení hodnoty ε (podle zásad, které jsou uvedené níže);
- stanovení hodnoty směrodatné odchylky parametru X dle vztahu $s_x = \frac{z_{Xmax}}{\varepsilon}$.

Hodnota ε je závislá na předpokládaném rozdělení hustoty pravděpodobnosti. Jedná se o Gaussovo nebo trojúhelníkové rozdělení v případě, že pravděpodobnost odchylek s rostoucí hodnotou klesá a největší pravděpodobnost výskytu mají malé odchylky. V případě, že jde o tyto rozdělení je hodnota ε rovna 3 u Gaussova rozdělení a 2,45 v případě trojúhelníkového rozdělení. Tvary rozdělení jsou zobrazeny na obr. 4.3. V případě, že je pravděpodobnost výskytu velkých i malých odchylek na intervalu $\pm z_{Xmax}$ téměř stejná, použije se pro aproximaci rozdělení rovnoměrné a hodnota ε rovna $\sqrt{3}$. [4]

Koeficient ϵ pro výpočet dílčí nejistoty typu B		
Statické rozdělení	$Z_{X_{max}}$	ϵ
<p>Normální (Gaussovo)</p> 	<p>$a = 2s$ $a = 3s$ $a = hs$</p> <p>s - směrodatná odchylka</p>	<p>2 3 h</p>
<p>Trojúhelníkové</p> 	<p>a</p>	<p>$\sqrt{6} = 2,45$</p>

Obr. 4.3 Hodnoty koeficientu ϵ pro výpočet nejistot stanovené způsobem B [4]

V případě, že známe funkci nezávislých parametrů (X_1, X_2, \dots, X_m) Y , kterou lze vyjádřit vztahem 4.4 - $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$, poté je možné stanovit standardní nejistotu určenou metodou B této funkce pomocí Gaussova zákona šíření chyb ve smyslu:

$$u_{BY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} Sx\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} Sx\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} Sx\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} Sx\right)^2}; \quad (4.7)$$

kde

Sx – směrodatná odchylka parametru X_j ;

$\frac{\partial Y}{\partial X_i}$ – parciální derivace funkce Y podle parametru X_j .

4.3 VÝPOČET CELKOVÉ NEJISTOTY POMOCÍ RELATIVNÍCH DÍLČÍCH NEJISTOT

U funkcí, které jsou typu mocninného součinu, lze stanovit nejistoty pomocí relativních dílčích nejistot. Mluvíme o funkcích, které lze obecně zapsat v tomto tvaru:

$$Y = a \cdot X_1^{b_1} \cdot X_2^{b_2} \cdot \dots \cdot X_j^{b_j} \cdot \dots \cdot X_m^{b_m}; \quad (4.8)$$

kde

X_1, X_2, \dots, X_m – nezávislé parametry;

a, b_1, b_2, \dots, b_m – konstanty. [4]

Dle této metody lze stanovit standardní nejistotu určenou metodou A funkce Y pomocí vztahu:

$$\frac{u_{AY}}{\hat{y}} = \sqrt{\left(b_1 \frac{s_{\bar{x}_1}}{x_1}\right)^2 + \left(b_2 \frac{s_{\bar{x}_2}}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(b_i \frac{s_{\bar{x}_j}}{x_j}\right)^2 + \dots + \left(b_m \frac{s_{\bar{x}_m}}{x_m}\right)^2}; \quad (4.9)$$

kde

\hat{y} – hledaná hodnota funkce Y;

$s_{\bar{x}_1}$ – směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X_j .

Tento vztah (4.9), který je formulován v relativních hodnotách je možná přepsat do následujícího tvaru:

$$p_{AY} = \sqrt{\left(b_1 \cdot p_{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(b_2 \cdot p_{\bar{x}_2}\right)^2 + \dots + \left(b_i \cdot p_{\bar{x}_j}\right)^2 + \dots + \left(b_m \cdot p_{\bar{x}_m}\right)^2}; \quad (4.10)$$

kde

$\frac{u_{AY}}{\hat{y}} = p_{AY}$ – relativní standardní nejistota určená metodou A;

$p_{\bar{x}_j}$ – relativní směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X_j .

Tímto způsobem je možné přepsat i relativní standardní nejistotu určenou metodou B funkce Y:

$$p_{BY} = \sqrt{\left(b_1 \cdot p_{x_1}\right)^2 + \left(b_2 \cdot p_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(b_i \cdot p_{x_j}\right)^2 + \dots + \left(b_m \cdot p_{x_m}\right)^2}; \quad (4.11)$$

kde

p_{x_j} – relativní směrodatná odchylka parametru X_j . [4]

Použití výše uvedeného způsobení určení relativních standardních nejistot stanovených způsobem A i B je významným zjednodušením výpočtu nejistot. Výpočet nejistot, které se určovaly v této bakalářské práci, se prováděl právě tímto výše popsaným způsobem.

5 NEJISTOTA MĚŘENÍ PŘI UŽITÍ PLOŠNÉ INTEGRAČNÍ METODY

Následující podkapitoly se věnují popisu zdrojů nejistot, které byly použité pro výpočet celkové nejistoty průtoku při užití plošné integrační metody. Pro prizmatické koryto s pravoúhlým profilem existuje rovnice (2.3) vycházející z principu metody rychlostního pole tak, jak byla uvedena v kapitole 2.3.1. Z ní lze určit dominantní zdroje nejistoty, které odpovídají jednotlivým vstupním parametrům. Rovnici lze zapsat jako:

$$Q = Bh\bar{v}; \quad (2.3)$$

kde

Q – průtočné množství;

B – šířka průtočného profilu;

h - hloubka průtočného profilu;

\bar{v} – průřezová rychlost.

Kombinace dílčích nejistot tvoří hodnotu výsledné nejistoty. Jedná se především o tyto nejistoty:

- nejistota stanovená způsobem A a B při měření šířky měrného profilu;
- nejistota stanovená způsobem A a B při měření hloubky měrného profilu;
- nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu;
- nejistota stanovená způsobem A a B zohledňující kalibraci a chování měřidla bodové rychlosti vodního proudu;
- nejistota stanovená způsobem A ve stanovení průměrné rychlosti na svislici;
- nejistota stanovená způsobem B ve stanovení průtoku závisující na počtu měrných svislic v měrném profilu. [4]

Výše uvedené zdroje nejistot se uvažují především pro klasickou metodu rychlostního pole, v případě plošné integrační metody se uvažuje se zdroji uvedenými v kap. 5.1.

V praxi se používá způsob výpočtu, kdy dojde k přenásobení nejistot určených metodou A i B koeficientem rozšíření o hodnotě $k_U = 2$. Lze tedy říct, že hovoříme o rozšířených nejistotách na hladině spolehlivosti 95 %. Tento způsob výpočtu je uvažován i u následujících nejistot.

Výslednou hodnotu rozšířené kombinované nejistoty při stanovení průtoku získáme po sloučení relativních nejistot určených oběma typy ze vztahu:

$$p_Q = \sqrt{p_{AQ}^2 + p_{BQ}^2}. \quad (5.1)$$

5.1 NEJISTOTA STANOVENÁ ZPŮSOBEM A PŘI MĚŘENÍ PRŮTOKU INTEGRAČNÍ METODOU

V případě využití integrační metody pro měření průtoku lze určit relativní nejistotu určenou metodou A na základě vztahu:

$$p_{AQ} = \sqrt{p_{AB}^2 + p_{Ah}^2 + \frac{1}{N}(p_{Ac}^2 + p_{Au}^2)}; \quad (5.2)$$

kde

p_{Ab} – relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu;

p_{Ah} – relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky proudu;

p_{Ac} – relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení kalibračních konstant měřidla bodových rychlostí;

p_{Au} – relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu v měrném profilu. [3]

5.1.1 Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu - p_{AB}

Určení nejistoty je možné provést statistickým výpočtem, který je popsán v kapitole 4. Další možností výpočtu nejistoty je převzetí hodnoty nejistoty z měření, která byla provedena v podobných podmínkách. Doporučené hodnoty nejistoty najdeme v [3], a jsou uvedeny v tab. 5.1 a odpovídají hladině spolehlivosti 95 %.

Tab. 5.1 Hodnoty relativní nejistoty stanovené způsobem A ve stanovení šířky profilu na hladině spolehlivosti 95 % [3]

Celková šířka měrného profilu B v hladině [m]	Nejistota p_{AB} [%]	
	ocel, plast	beton
0,0 až 0,5	0,0	1,0
> 0,5	0,3	0,5

5.1.2 Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky - p_{Ah}

Hodnotu relativní nejistoty stanovené způsobem A ve stanovení hloubky lze stanovit analogicky k relativní nejistotě stanovení šířky profilu. Hodnoty, které vychází z [3], jsou uvedené tab. 5.2. I v tomto případě se jedná o nejistoty na hladině spolehlivosti 95 %.

Tab. 5.2 Hodnoty relativní nejistoty určené metodou A ve stanovení hloubky na hladině spolehlivosti 95 % [3]

Hloubka h [m]	Nejistota p_{Ah} [%]
< 0,1	3,0
0,1 až 0,2	1,5
> 0,2	1,0

5.1.3 Nejistota stanovená způsobem A ve stanovení kalibračních konstat EMI měřidla - p_{Ac}

Relativní hodnota nejistoty s hladinou spolehlivosti 95 % se převezme z ČSN EN ISO 748 [2] nebo z MP 010 [3]. Příslušné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.3. [3]

Tab. 5.3 Relativní nejistota reprodukovatelnosti kalibračních konstat měřidla bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % [3]

Rychlost [m/s]	Vodoměrná vrtule	EMI měřidlo
0,03	20,0	20,0
0,10	5,0	5,0
0,15	2,5	2,5
0,25	2,0	2,0
0,50	1,0	1,0
> 0,50	1,0	1,0

5.1.4 Nejistota určená metodou A ve stanovení bodové rychlosti proudu - p_{Au}

Velikost relativní nejistoty stanovené způsobem A ve stanovení bodové rychlosti závisí na několika faktorech, mezi které řadíme:

- absolutní hodnotu měřené rychlosti;
- intenzitu turbulence proudu;
- typ použitého měřidla rychlosti;
- dobu měření v bodě;
- pozice snímače měřidla vůči natékajícímu proudu. [3]

Hodnoty relativních nejistot podle [3] jsou uvedeny v tab. 5.4 v závislosti na době měření. Uvedené hodnoty jsou na hladině spolehlivosti 95 %.

Tab. 5.4 Hodnoty relativní nejistoty stanovené způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95 % [3]

Rychlost [m/s]	Nejistota p_{Au} [%] - 30s	Nejistota p_{Au} [%] - 60s
0,10	15,00	15,00
0,30	6,80	5,10
0,50	5,70	3,90
1,00	4,50	3,00

5.2 NEJISTOTA STANOVENÁ ZPŮSOBEM B PŘI MĚŘENÍ PRŮTOKU INTEGRAČNÍ METODOU

Velikost hodnoty nejistoty stanovená způsobem B při měření průtoku integrační metodou lze získat ze vztahu:

$$p_{BQ} = \sqrt{p_{BB}^2 + p_{Bh}^2 + p_{BC}^2 + p_{Bk}^2}; \quad (5.3)$$

kde

p_{BB} – relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu;

p_{Bh} – relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky proudu;

p_{BC} – relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační závislosti měřidla rychlosti vodního proudu;

p_{Bk} – relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení opravného koeficientu integrační metody. [3]

5.2.1 Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu - ρ_{BB}

Při výpočtu hodnoty nejistoty stanovené způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu bere důraz na použité měřidlo délek, možnost přesnosti odečtu měřených hodnot a na vliv ostatních nedefinovaných vlivů. Velikost hodnoty relativní nejistoty se stanoví z kalibračních a ověřovacích listů anebo se určí odhadem. [3]

5.2.2 Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky - ρ_{Bh}

Při výpočtu hodnoty relativní nejistoty stanovené způsobem B ve stanovení hloubky vody se musí brát důraz na použité délkové měřidlo, nejistoty v kalibraci měřidla a vliv ostatních nedefinovaných zdrojů. [3]

5.2.3 Nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační závislosti měřidla rychlosti vodního proudu- ρ_{Bc}

Velikost hodnoty relativní nejistoty stanovené způsobem B ve stanovení kalibračních konstant je dána způsobem kalibrace, který je dán specifickými okrajovými podmínkami kalibrační laboratoře, kde bylo příslušné měřidlo kalibrováno. Mezi okrajové podmínky řadíme:

- přesnost měření vzdálenosti;
- přesnost způsobu odečtu rychlosti uváděné měřidlem;
- a dalších specifických podmínek.

Velikost hodnoty relativní nejistoty na hladině spolehlivosti 95 % převezmeme z kalibračního listu příslušného měřidla. [3]

5.2.4 Nejistota stanovená způsobem B při určení opravného koeficientu - ρ_{Bk}

Dle [3] je relativní nejistota stanovená způsobem B při určení opravného koeficientu při ručním provádění metody s vodoměrnou vrtulí je rovna hodnotě 3,2 %. Hodnota relativní nejistoty stanovené způsobem B při stanovení opravného koeficientu při použití EMI měřidla je předmětem této bakalářské práce. [3]

6 POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Následující kapitola obsahuje popis použitého EMI měřidla, jeho specifikace, technické údaje a jeho přípravu před měřením. Dále jsou zde popsány hydraulické okruhy a žlaby laboratoří, na kterých byl výzkum proveden. Poté je zde popsán postup měření a použité rovnice k vyhodnocení veličin měření.

6.1 POUŽITÉ EMI MĚŘIDLO

Pro výzkum využití plošné integrační metody bylo použito EMI měřidlo MF Pro, které vyrobila společnost OTT Hydromet. V tab. 6.1 jsou vypsány vybrané technické údaje. Měřidlo je majetkem Fakulty stavební VUT.

Tab. 6.1 Technické údaje

Technické údaje	
Specifikace snímače	
Rozsah měření	0 až 6.09 m/s
Minimální hloubka vody	3.18 cm (1.25 palce)
Materiál	ABS. se sklolaminátem
Stabilita nulového bodu	± 0.015 m/s (0.05 stop/s)
Rozměry (DxŠxV)	11.9x4.3x6.3 cm
Přenosný měřicí přístroj	
Stupeň znečištění	2
Provozní teplota	-2 až 55C°
Materiál	polykarbonát s ochranným pancířem TPE
Rozměry (DxŠxV)	21.8X9.3X5.3 cm
Přípojka USB	Typ Mini - B, 5i-pólová, se zařazením IP67
Typ baterie	Opakované nabíjecí lithium-iontová, 3.7 V
Jednotky rychlosti	stopa/s, m/s, cm/s, mm/s
Jednotky průtoku	stopy ³ /s, galony/den, miliony galonů/den galony/min, m ³ /s, m ³ /den, l/s, l/min

Před zahájením výzkumu bylo měřidlo podrobena kalibraci. Ta byla provedena v akreditované kalibrační laboratoři vodoměrných měřidel ve VÚVH v Bratislavě. Stanovené parametry a požadované postupy kalibrace byly následující [8]:

- před zahájením kalibrace byla provedena justace měřidla na nulovou hodnotu
- minimální rychlost při kalibraci: 0,1 m/s;

- maximální rychlost při kalibraci: 1 m/s;
- kalibrační rovnice zpracovaná na základě surových dat poskytnutých kalibrační laboratoří byla vystižena funkcí:

$$v_{EMIKor} = 1,0353v_{EMI};$$

kde

v_{EMI} - hodnota rychlosti z displeje vyhodnocovací jednotky;

v_{EMIKor} - korigovaná rychlost.

Před samotným měřením jsme měřidlo vždy očistili v jemném čistícím prostředku. Odebrali jsme do nádoby protékající vodu a pomocí konduktometru DiST 3 EC Tester jsme určili měrnou vodivost a teplotu vody. Poté jsme měřidlo ponořili do vody s nulovou rychlostí a provedli justaci rychlosti na nulovou hodnotu.

Pro snadnější manipulaci byla použita ocelová tyč o průměru 9 mm, na kterou bylo upevněné tělo snímače měřidla. Z displeje vyhodnocovací jednotky byly odečítány příslušné hodnoty rychlosti.

6.2 HYDRAULICKÉ OKRUHY LABORATOŘE

Pro výzkum využití plošné integrační metody byly využity hydraulické okruhy Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT.

Ústav vodních staveb Fakulty stavební má v současné době k dispozici 5 různých nezávislých hydraulických okruhů, které jsou využívány k výzkumným účelům či při výuce. Při výzkumu byl použit okruh, který se nachází v budově B (dále označen jako hydraulický okruh č.1) a okruh v budově F (dále označen jako hydraulický okruh č. 2).

6.2.1 Hydraulický okruh č.1

Jedná se o nejstarší hydraulický okruh, který byl zprovozněn v lednu v roce 1917. Nachází se v laboratoři umístěné v budově B. V roce 2006 došlo k jeho první výraznější rekonstrukci od začátku jeho vybudování. Poté došlo v nadcházejících letech k dalším úpravám.

Nyní se současný hydraulický okruh skládá z podzemního zásobníku vody, který má objem až 45 m³, z čerpací stanice a z tří hydraulických žlabů. Čerpací stanice se

skládá ze dvou ponorných odstředivých čerpadel, z nerezového potrubí o průměrech DN 150 až DN 300, které je opatřeno šesti klapkovými uzavěry a indukčním průtokoměrem. Průtokoměr je nainstalován na reverzní měrné trati. Rozvodné potrubí spolu s polohou jeho uzavíracích klapek je řešeno tak, aby bylo možné použít nezávisle na sobě více měrných tratí. Dále se čerpací stanice skládá ze systému kabelových tras elektrické energie, datových kabelů, vlastního řídicího a vizuálního systému. Vizuální systém je umístěn ve skříňovém rozvaděči, kde je spolu s ním umístěn i frekvenční měnič ponorných čerpadel s příslušenstvím. Čerpací stanice je vybavena pro případ připojení volně stojícího modelu i tlakovým rezervním výstupem. Nátok vody do měrných žlabů je pro všechny tři žlaby stejný. Před nátokem každého z nich je umístěn Thomsonův měrný přeliv.

Hydraulický okruh můžeme ovládat pomocí řídicí jednotky, kterou tvoří 10" dotykový panel. Ten umožňuje kompletní řízení systému, monitoring a archivaci všech měřených neelektrických provozních veličin. Další možností je ovládání okruhu ze vzdáleného počítače. [13]

6.2.2 Hydraulický okruh č. 2

Tento hydraulický okruh se nachází v budově F. Jedná se největší hydraulický okruh Ústavu vodních staveb a byl vybudován v roce 2003.

Hydraulický okruh se skládá také z podzemní zásobní nádrže, která má objem až 80 m³ vody. Nachází se zde celkem čtyři ponorná odstředivá čerpadla, která jsou instalována v sací jímce v prohloubené části podzemní nádrže. Okruh je možné provozovat v tlakovém i v gravitačním provozu. Při provozování systému v tlakovém režimu dochází k přímému propojení výtlačného potrubí s přívody jednotlivých měrných žlabů. Tím zajistíme, že voda je až k začátku měrné tratě dopravena pod tlakem. Systém gravitační je provozován tak, že využívá v nejvyšší části objektu situované nádrže, která zajistí velikost a stabilitu požadovaného průtoku. Rozvodné potrubí je nerezové o průměrech DN 200 do DN 350. Je opatřeno celkem dvanácti uzavíracími klapkami a pěti regulovatelnými šoupaty. Pro měření průtoku jsou zde nainstalovány indukční průtokoměry, při použití gravitačního režimu je průtok stanoven pomocí Thomsonova měrného přelivu. Čerpací stanice napájí celkem čtyři měrné tratě. Okruh je kompletně ovládán elektro-technologickým vybavením. To sestává z kabelových rozvodů elektrické

energie, datových kabelů a ze skříňového rozvaděče o čtyřech polích. V rozvaděči je kromě frekvenčních měničů ponorných čerpadel umístěn i řídicí systém od firmy SIEMENS. Ten je propojen s ovládacím a vizualizačním počítačem, jehož plochu lze zobrazit i na vzdáleném počítači.

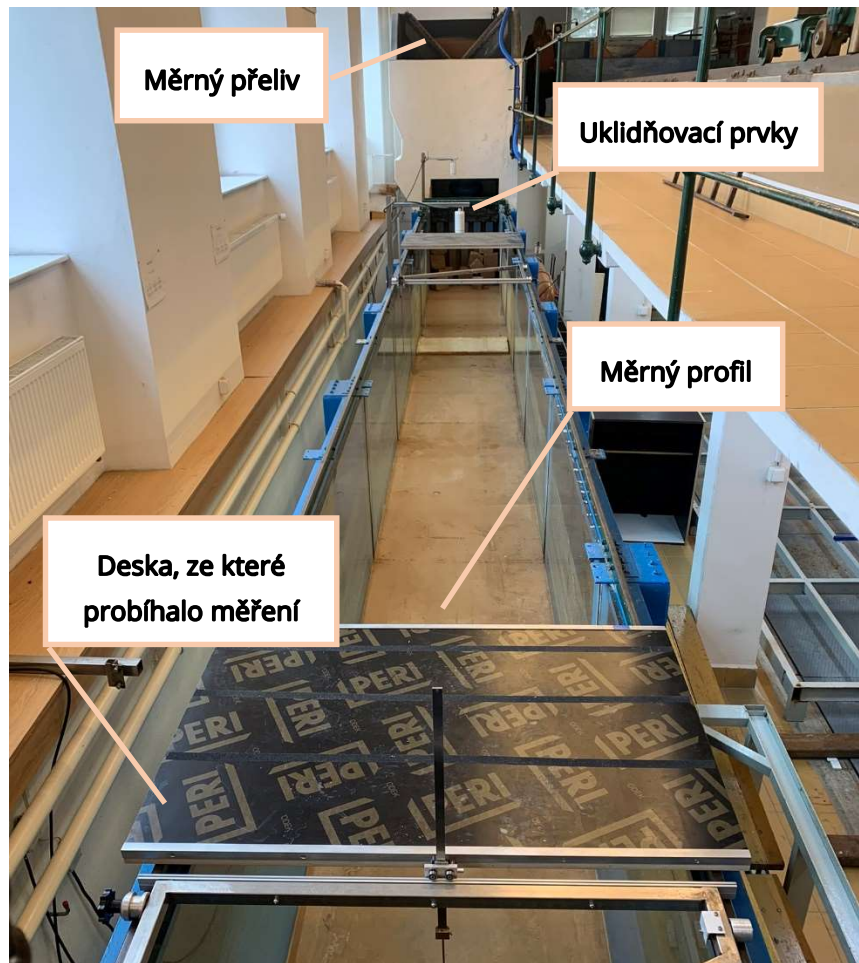
Pro řízení laboratoře jsou zde nainstalovány dva parametrizační panely. Celý systém registruje přibližně 70 údajů elektro-technologických veličin, z nich je 24 neelektrického charakteru pravidelně archivovaných s periodicitou 15 sekund. Dále je zde PID regulátor, který v automatickém režimu reguluje průtok jednotlivých měrných žlabů. Při tlakovém provozu lze očekávat dosažení požadovaného průtoku do 1,5 minuty. Díky této „pružné“ regulaci, je zde možné dokonce simulovat pozvolně se měnící průtok. [13]

6.3 HYDRAULICKÉ ŽLABY

Měření v rámci předložené bakalářské práce bylo provedeno na dvou hydraulických měrných žlabech. Na žlabu o jmenovité šířce 0,4 m (dále označen jako žlab 40) a na žlabu o jmenovité šířce 1,0 m (dále označen jako žlab 100).

6.3.1 Žlab 100

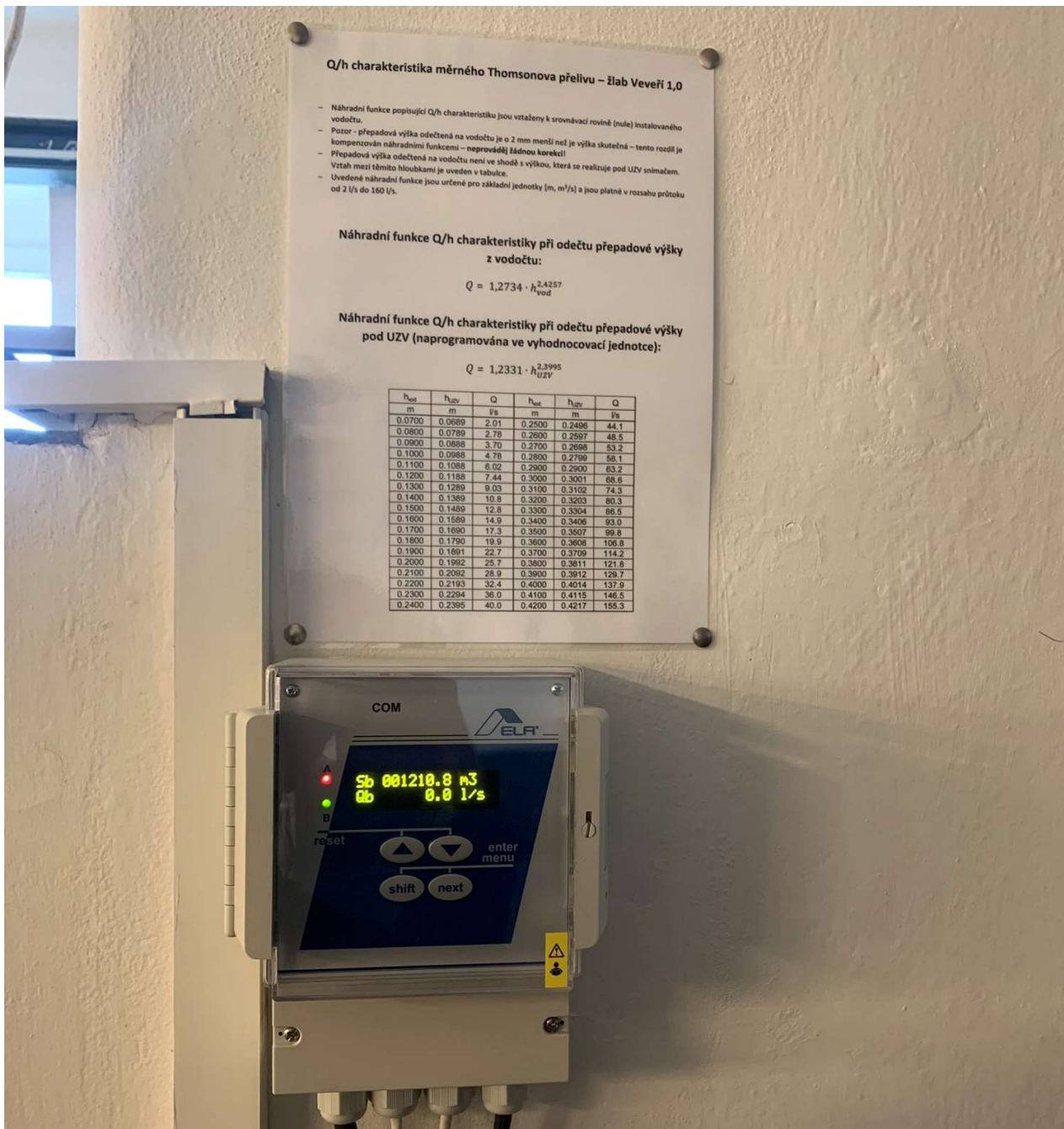
Žlab 100 je umístěn v laboratoři v budově B. Jeho šířka je 1,008 m, délka je 14 m. Hlavní nosná konstrukce je vyrobena z betonu. Stěny žlabu jsou prosklené a dosahují výšky 0,9 m. Čerpání vody do žlabu zajišťuje hydraulický okruh č.1 (viz kapitola 6.2.1). Největší maximální možný průtok je 160 l/s. Jako referenční měřidlo je zde použit Thomsonův měrný přeliv, který je metrologicky navázán přes indukční průtokoměr laboratoře. Pro uklidnění proudu na přítoku je ve žlabu vybudovaná tlumicí komora a další stabilizační prvky. Na konci žlabu jsou nainstalovány vertikální žaluzie, pomocí kterých byla nastavována hladina vody. Žaluzie lze vidět na obr. 6.2. Pro stanovení hloubky vody bylo použito hrotové měřidlo. Na žlabu je umístěna deska, ze které probíhalo samotné měření. [9]



Obr. 6.1 Měrný žlab 100



Obr. 6.2 Vertikální žaluzie – žlab 100

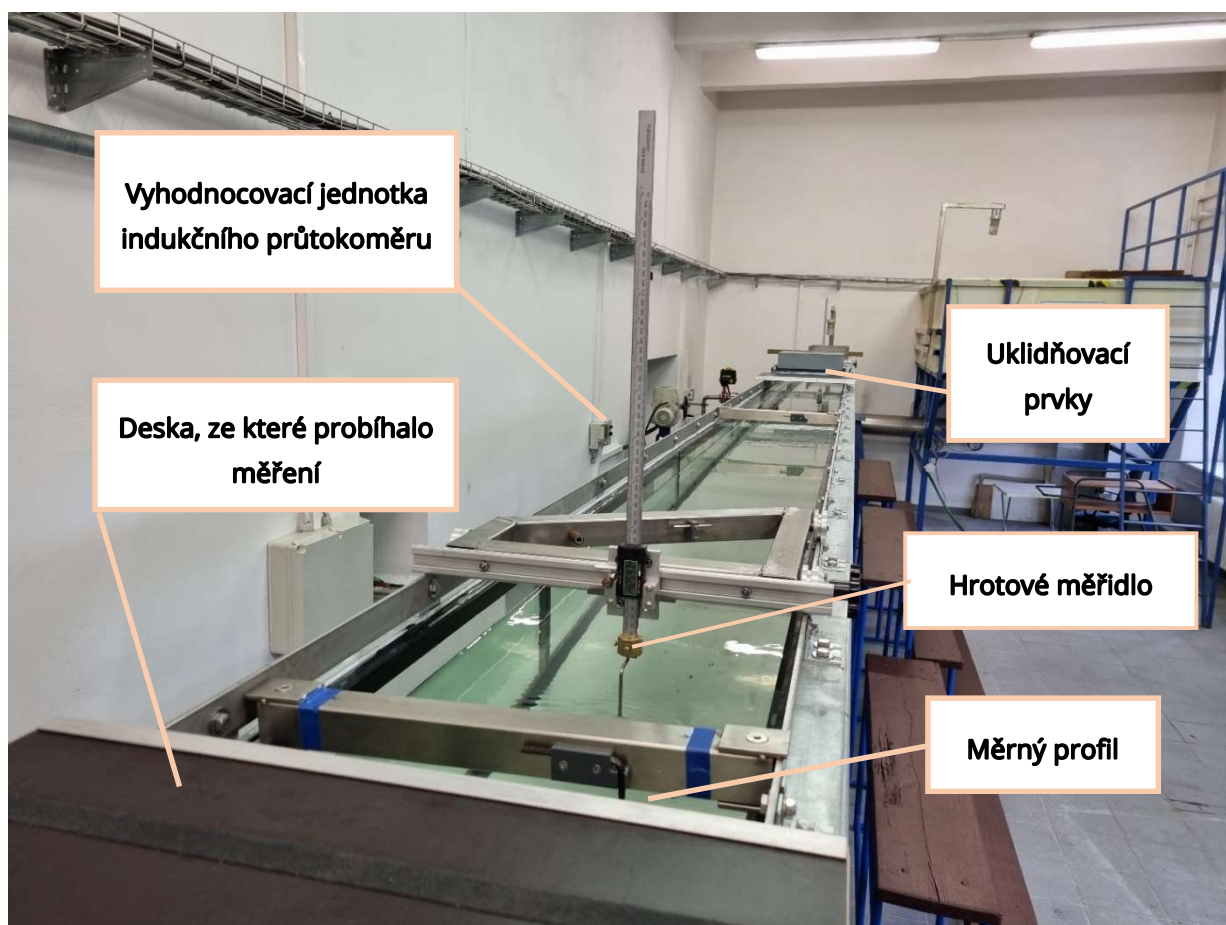


Obr. 6.3 Vyhodnocovací jednotka – žlab 100

6.3.2 Žlab 40

Měrný žlab se nachází v laboratoři v budově F. Jedná se o ocelový žlab s šířkou 0,410 m a délkou 12,5 m, výška prosklených stěn je 0,5 m. Žlab je napojen na hydraulický okruh č.2 (viz kapitola 6.2.2). Maximální průtok, který je žlab schopen převést je 85 l/s. Na tlakovém přiváděcím potrubí je nainstalován indukční průtokoměr DN 150, kterým je

měření příslušný aktuální průtok. Hodnoty průtoku jsou zaznamenány do paměti řídicího počítače. Na zdi u žlabu se nachází řídicí jednotka, kde je možné zpětně po zásahu dohledat průměrné hodnoty průtoku stanovené na intervalu 5 minut. Na začátku měrného žlabu se nacházejí uklidňovací prvky. Na odtoku ze žlabu se nacházejí plastové dluže, pomocí kterých byla regulována hladina vody. Pro stanovení hloubky vody bylo použito hrotové měřidlo, které lze vidět na obr. 6.5. Měření probíhalo z podesty umístěné na žlabu.



Obr. 6.4 Měrný žlab 40



Obr. 6.5 Hrotová měřidlo umístěné na žlabu 40

6.4 POSTUP MĚŘENÍ

Měření proběhlo na měrných žlabech 40 a 100 (jejich popis je uveden v kapitole 6.2.2). Provedlo se celkem 620 měření integrační plošnou metodou. Měření jsme rozdělili do 31 sad po 20 měření, vždy se měřily 10krát dvě horizontály a 10krát tři horizontály. Jako sada je označeno měření pro jednu konkrétní rychlost v kombinaci s konkrétní hloubkou. Pro snadnější orientaci je každá sada měření označena kódem měření. Výpis jednotlivých sad měření lze vidět v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Přehled jednotlivých sad měření

Číslo sady	Kód měření	Žlab 40			Číslo sady	Kód měření	Žlab 100		
		Rychlost [m/s]	Hloubka [m]	Průtok [l/s]			Rychlost [m/s]	Hloubka [m]	Průtok [l/s]
1	40100150	0.1	0.15	6.15	17	100100150	0.1	0.15	15.14
2	40100200	0.1	0.20	8.20	18	100100200	0.1	0.20	20.18
3	40100300	0.1	0.30	12.30	19	100100300	0.1	0.30	30.27
4	40100400	0.1	0.40	16.40	20	100100400	0.1	0.40	40.36
5	40200150	0.2	0.15	12.30	21	100200150	0.2	0.15	30.27
6	40200200	0.2	0.20	16.40	22	100200200	0.2	0.20	40.36
7	40200300	0.2	0.30	24.60	23	100200300	0.2	0.30	60.54
8	40200400	0.2	0.40	32.80	24	100200400	0.2	0.40	80.72
9	40300150	0.3	0.15	18.45	25	100300150	0.3	0.15	45.41
10	40300200	0.3	0.20	24.60	26	100300200	0.3	0.20	60.54
11	40300300	0.3	0.30	36.90	27	100300300	0.3	0.30	90.81
12	40300400	0.3	0.40	49.20	28	100300400	0.3	0.40	121.08
13	40500150	0.5	0.15	30.75	29	100500150	0.5	0.15	75.68
14	40500200	0.5	0.20	41.00	30	100500200	0.5	0.20	100.90
15	40500300	0.5	0.30	61.50	31	100500300	0.5	0.30	151.35
16	40500400	0.5	0.40	82.00					

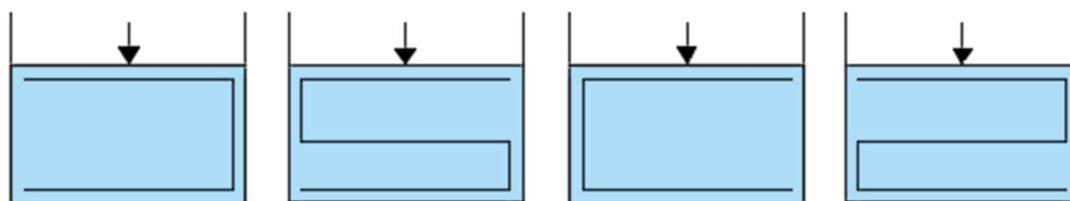
Pro měření byly zvoleny rychlosti proudu od 0,1 m/s do 0,5 m/s a k nim příslušné hloubky od 0,15 m do 0,4 m. V případech úředního měření prováděného v prizmatických korytech se vyskytují kombinace těchto hloubek a rychlostí nejčastěji. Z tohoto důvodu byly zvoleny i pro naše měření.

Tab. 6.3 byla uvedena i pro představu ohledně časové náročnosti celého měření. Jak již bylo výše zmíněno, celkově bylo provedeno 31 sad měření. Během jednoho dne jsme průměrně naměřili 4 sady měření. Příprava měření jedné sady byla průměrně 15 minut, celkové měření zabralo cca 10 minut, v některých případech i déle. V případě, že počítáme celkový čas měření jedné sady jako 35 minut, byla celková doba měření všech sad 1085 minut.

Tab. 6.3 Časová náročnost měření

	žlab 40		žlab 100	
Celkový počet sad	16		15	
Příprava měření jedné sady	15	min	15	min
Měření	10	min	10	min
Rezerva	10	min	10	min
Celkový čas jedné sady	35	min	35	min
Celkový čas měření všech sad pro konkrétní žlab	560	min	525	min
	9.3	hod	8.75	hod
Celkový čas pro oba žlaby	1085			min
	18.1			hod

Schéma posunu měřidla je uvedeno na obr. 6.6, záleželo vždy na počtu zvolených horizontál. Abychom potlačili vliv případné deformace rychlostního pole na měřené výsledky, provedli jsme z 10 opakování přesunu měřidla vždy 5 jedním směrem a 5 směrem opačným při dvou, resp. 3 horizontálách. V [3] je uvedená minimální výšková odlehlost EMI měřidla ode dna, hladiny a stěn, ta činí 1,5násobek průměru snímače měřidla. Obvykle je to 50 mm, což bylo i v našem případě.

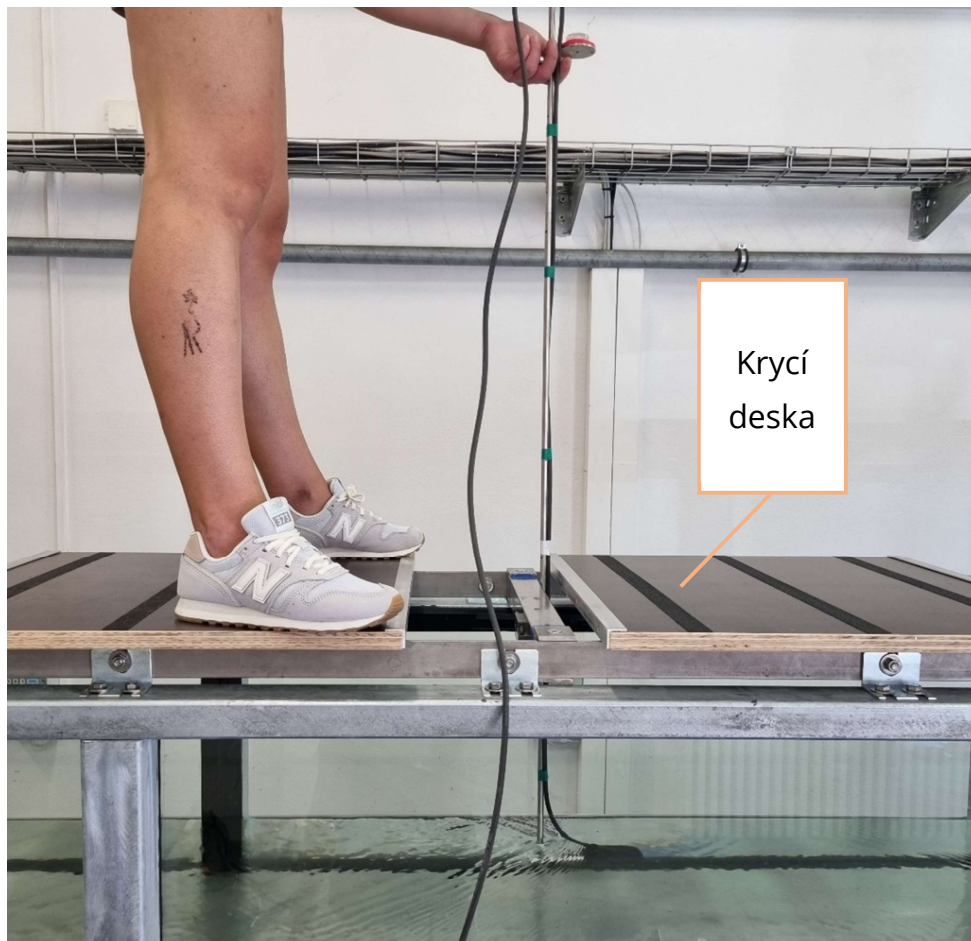


Obr. 6.6 Schéma pojezdu v závislosti na počtu horizontál

Před každým měřením jsme odebrali do nádoby vodu, u které jsme změřili teplotu, měrnou vodivost a provedli justaci na nulovou hodnotu. (Podrobněji popsáno v kap. 6.1). Měření byla prováděna dvěma měřiči – mnou (dále Jechová) a Ing. Žouželou (dále Žoužela) s tím, že jsme se při měření pravidelně střídali. Na žlabu 40 jsme provedli měření, jež jsme rozdělili do šestnácti sad. Každá sada byla složena z měření pro všechny možné kombinace zvolené hloubky a rychlosti s posunem na dvou horizontálách a s posunem po třech horizontálách. Všechna měření se desetkrát opakovala. Střídali jsme se po jedné sadě měření. V případě měření na žlabu 100 jsme se vždy střídali po 5

z 10 opakování u každé sady. Při ručním měření hraje velkou roli schopnosti a zkušenosti měřiče. V případě střídání měřičů tak můžeme hodnoty porovnat a ověřit jejich variabilitu. Rychlost měření byla zvolená jednotná pro všechny sady, konkrétně byla zvolena rychlost posunu okolo 2 m/min. MP 010 [3] doporučuje provádět měření při použití vodoměrných vrtulí rychlostí posunu 2 m/min, z toho důvodu jsme zvolili právě tuto rychlost i v tomto případě.

Při měření v odpadní vodě není často možné vizuálně kontrolovat pozici snímače, tím se měření stává pro měřiče komplikovanější a je nutné plné soustředění na plynulé a správné vedení snímače v měrném profilu. Současně se musí sledovat svislost soutyčí a pozice snímače vzhledem k natékajícímu proudu. Správnost měření je pak závislá prakticky jen na schopnostech měřiče. Z tohoto důvodu jsme provedli měření i se zakrytým pohledem na snímač, kdy jsme na žlab upevnili krycí desku viz obr. 6.7.



Obr. 6.7 Realizace měření se zakrytým pohledem na snímač

6.5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Hodnoty rychlostí z vyhodnocovací jednotky EMI měřidla jsme zapisovali do formuláře, který lze vidět na obr. 6.8. Formulář byl vytvořen v aplikaci Excel a programován na vyhodnocení veličin dle vztahů uvedených v celé bakalářské práci, převážně dle rovnic uvedených v kapitole 6.5.1.

Formulář byl koncipován tak, že do buněk vyplněných modrou barvou jsme zapisovali příslušné hodnoty či údaje. Políčka označená žlutou barvou jsou naprogramována na vyjádření příslušných hodnot, jejich způsob výpočtu je uveden v kapitole 6.5.1. Každá sada měření má svůj samostatný formulář a kód měření, který je složen z příslušného žlabu, rychlosti a hloubky a z místa, kde bylo měření provedeno. Také se tam nachází schéma posunu měřidla s vyznačením času v %, který sloužil ke kontrole dodržení definované rychlosti pojezdu – 2 m/min. Na vyhodnocovací jednotce použitého měřidla je uvedena doba měření v % a bylo tak možné průběžně provádět kontrolu rychlosti posunu. Na konci je rekapitulační tabulka, kde je uveden kód měření, dvojnásobek směrodatné odchylky deseti měřených rychlostí, hydraulický poloměr, opravný koeficient a průřezová vztažná rychlost.

Všechny hodnoty se následně vždy vhodně sloučily dohromady a vytvořily se grafy, ze kterých lze mezi sebou jednotlivé výsledky porovnat. Vyhodnocení výsledků měření je podrobně popsáno v kapitole 7.

Plošná manuálně realizovaná integrační metoda měření průtoku s EMI měřidlem									
Kód měření	100300150		Referenční podmínky					Datum 14.7.2022	
Měřil	Žoužela, Jechová		Teplota vody T	20.9 °C		Emi měřidlo MF Pro			
Zapisoval	Jechová, Žoužela		Měrná vodivost V	619 μS/cm		Majitel	FAST VUT		
			Rychlost posunu w	2 m/min		Výrobní číslo	338316		
Požadované parametry									
Požadovaná rychlost $v_{pož}$	0.3 m/s		Požadovaná hloubka $H_{pož}$	0.15 m					
Požadovaný průtok $Q_{pož}$	45.36 l/s		Šířka žlabu B_{lab}	1.008 m					
Min. vzdálenost středu snímače ode dna	0.05 m		Min. vzdálenost středu snímače od stěn	0.05 m					
Změřené a vyhodnocené parametry v laboratorní trati									
$Q_{Thomson}$	45.93 l/s								
Plocha průtočného profilu S_{lab}	0.154 m ²		Hloubka lab H_{lab}	0.152 m					
Prům. vztažná rychlost v_{lab}	0.299 m/s		Délka omoč. povrchu O_{lab}	1.313 m					
Hydraulický poloměr R_{lab}	0.117 m								
Posun po 2 horizontálách									
Měření			kód	100300152					
			Pozice horizontál H_{dno}	0.050 m		H_{hlad}	0.102 m		
i	v_{EMI} [m]	v_{EMIkor} [m]	Vzdálenost od horního nosníku H_n	0.052 m					
1	0.316	0.327	Délka dráhy posunu L_2	1.868 m					
2	0.316	0.327	Teoretický čas posunu t_{zlab}	56 s					
3	0.312	0.323	Průměr	$v_{2EMI\ prům}$		0.326 m/s			
4	0.317	0.328	Výběrová směrodatná odchylka	σ_{2EMI}		0.0046 m/s			
5	0.313	0.324	Dvojnásobek směrodatné odchylka	$2x\sigma_{2EMI}$		0.0091 m/s			
6	0.308	0.319	Opravný koeficient	k_2		0.9187 -			
7	0.320	0.331	Schéma posunu měřidla dle času v %						
8	0.317	0.328	100%	51%	kor	1.0353			
9	0.307	0.318							
10	0.319	0.330							
			0%	49%					
Posun po 3 horizontálách									
Měření			kód	100300153					
			Pozice horizontál H_{dno}	0.050 m		H_{hlad}	0.102 m		
i	v_{EMI} [m]	v_{EMIkor} [m]	Vzdálenost od horního nosníku H_n	0.026 m		$H_{stř}$	0.076 m		
1	0.317	0.328	Délka dráhy posunu L_3	2.77632 m					
2	0.318	0.329	Teoretický čas posunu t_{zlab}	83 s					
3	0.319	0.330	Průměr	$v_{3EMI\ prům}$		0.327 m/s			
4	0.321	0.332	Výběrová směrodatná odchylka	σ_{3EMI}		0.0030 m/s			
5	0.314	0.325	Dvojnásobek směrodatné odchylka	$2x\sigma_{3EMI}$		0.0060 m/s			
6	0.314	0.325	Opravný koeficient	k_3		0.9138 -			
7	0.316	0.327	Schéma posunu měřidla dle času v %						
8	0.318	0.329	67%	100%	kor	1.0353			
9	0.312	0.323	66%	34%					
10	0.313	0.324							
			0%	33%					
Rekapitulace - posun po 2 horizontálách					Rekapitulace - posun po 3 horizontálách				
Kód měření	$2x\sigma_{2EMI}$	R_{lab}	k_2	v_{lab}	Kód měření	$2x\sigma_{3EMI}$	R_{lab}	k_3	v_{lab}
100300152	0.0091	0.117	0.9187	0.299	100300153	0.0060	0.117	0.9138	0.299

Obr. 6.8 Ukázka formuláře pro měření 100300150

6.5.1 Stanovení hodnot sledovaných veličin měření

V následujících podkapitolách jsou uvedeny vztahy pro výpočet jednotlivých veličin uvedených ve formuláři, který lze vidět na obr. 6.8. Jsou zde uvedeny rovnice pro výpočet průtoku, plochy průtočného profilu, omočeného obvodu a hydraulického poloměru. Dále je zde uveden popis spojnice trendu, kterou jsme používali pro vyhodnocení dat v grafech.

6.5.1.1 Požadovaný průtok $Q_{pož}$

Pro výpočet průtoku (značeno ve formuláři jako $Q_{pož}$), který jsme požadovali, aby protékal ve žlabu jsme počítali ve smyslu rovnice 2.3, která je uvedena v kapitole 2.3.3:

$$Q_{pož} = B_{lab} H_{pož} v_{pož}. \quad (6.1)$$

6.5.1.2. Skutečný průtok v laboratoři Q_{lab}

Stanovení průtoku, který skutečně protékal žlabem (ve formuláři značen jako Q_{lab}), se prováděl dvojím způsobem v závislosti použitým na hydraulickém žlabu (okruhu).

Pro žlab 40 se výpočet průtoku prováděl pomocí podílu nateklého objemu vody za čas ve smyslu rovnice:

$$Q_{lab} = \frac{V_{kon} - V_{zač}}{t}, \quad (6.2)$$

kde

$V_{zač}$ – počáteční objem proteklé vody ve žlabu před začátkem měření;

V_{kon} – konečný objem proteklé vody ve žlabu po konci měření;

t - doba, po kterou bylo měření prováděné.

Jak již bylo definované výše, konkrétně v kapitole 6.3.1, na žlabu 100 je použit Thomsonův přeliv a výpočet průtoku se provádí podle rovnice, která byla pro něj konkrétně určená z výzkumných prací, které se na něm provedly. Rovnice je definována ve smyslu:

$$Q_{lab} = 1.2734 \cdot h_{skut}^{2,4257}; \quad (6.3)$$

kde

h_{skut} – skutečná přepadová výška vody odečtená ze stupnice u vyhodnocovací jednotky žlabu 100.

6.5.1.3 Plocha průtočného profilu S_{lab}

Žlab 40 i žlab 100 mají obdélníkový půdorys. Plocha průtočného profilu je rovna:

$$S_{lab} = H_{lab} \cdot B_{lab} ; \quad (6.4)$$

kde

B_{lab} – je šířka příslušného žlabu;

H_{lab} – je hloubka vody odečtená pomocí hrotového měřidla.

6.5.1.4 Průřezová vztažná rychlost v_{lab}

Průřezová vztažná rychlost byla vypočtena ve smyslu rovnice kontinuity 2.4, která je uvedena v kapitole 2.3.4:

$$Q_{lab} = S_{lab} \cdot v_{lab}; \quad (6.5)$$

kde

Q_{lab} – skutečný průtok v laboratoři;

S_{lab} – plocha průtočného profilu.

6.5.1.5 Délka omočeného obvodu O_{lab}

Délku omočeného obvodu jsme spočítali pomocí následujícího vzorce:

$$O_{lab} = 2 \cdot H_{lab} + B_{lab}. \quad (6.6)$$

kde

B_{lab} – je šířka příslušného žlabu;

H_{lab} – je hloubka vody odečtená pomocí hrotového měřidla.

6.5.1.6 Hydraulický poloměr R_{lab}

Pro výpočet hydraulického poloměru byl použit vzorec:

$$R_{lab} = \frac{S_{lab}}{O_{lab}}; \quad (6.7)$$

kde

S_{lab} – plocha průtočného profilu;

O_{lab} – délka omočeného obvodu.

6.5.1.7 Výběrová směrodatná odchylka σ_{2EMI}

Směrodatná odchylka je veličina, která popisuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchyleny od průměru z jednotlivých měřených hodnot. Její výpočet lze provést pomocí rovnice:

$$\sigma_{EMI} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)}; \quad (6.8)$$

kde

n – počet měření parametru x ;

\bar{x} – průměr měřených parametrů x .

Směrodatná odchylka je ve formuláři uvedena jako σ_{2EMI} , která označuje směrodatnou odchylku pro dvě horizontály a σ_{3EM} , která označuje směrodatnou odchylku pro tři horizontály.

6.5.1.8 Opravný koeficient k

Hodnota opravného koeficientu k byla určena z rovnice 2.5, která je uvedena v kapitole 2.3.4.1:

$$v = k \cdot v_{int}. \quad (2.5)$$

6.5.1.9 Spojnice trendu

Naměřené body, které jsou vyneseny do grafů v následujících kapitolách, jsou proloženy spojnici trendu. Spojnice trendu je křivka vypočtená na základě rovnic regresní analýzy z vnesených dat tak, aby co nejpřesněji vystihovala jejich průběh. Existuje několik druhů spojníc trendu, v našem případě byla použita výhradně mocninná spojnice trendu, která se používá pro ryze monotónní funkce, v našem případě se jedná o rostoucí funkci. [15]

6.5.1.10 Pás spolehlivosti

Pro snadnější interpretaci výsledků byl sestaven okolo průběhu hodnot z regresních rovnic pás spolehlivosti na hladině spolehlivosti 95 %. V praxi to znamená, že pokud by bylo provedeno 100 měření, na základě kterých by byl odhadnut interval výsledných hodnot, pouze 5 hodnot z měření by do tohoto intervalu nespadlo. Výpočet hodnoty IP, která vystihuje pás spolehlivosti, byl proveden na základě Studentova rozdělení. Výpočet byl proveden dle rovnice:

$$IP = t_a \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_{regi} - k_i)^2}{(n-2)}} ; \quad (6.9)$$

kde

t_a – kritická hodnota Studentova rozdělení na hladině významnosti 0,05 s počtem stupňů volnosti 2;

k_{reg} - hodnota opravného koeficientu vypočtená na základě regresní rovnice uvedené v příslušných grafech;

k - měřením stanovená hodnota opravného koeficientu;

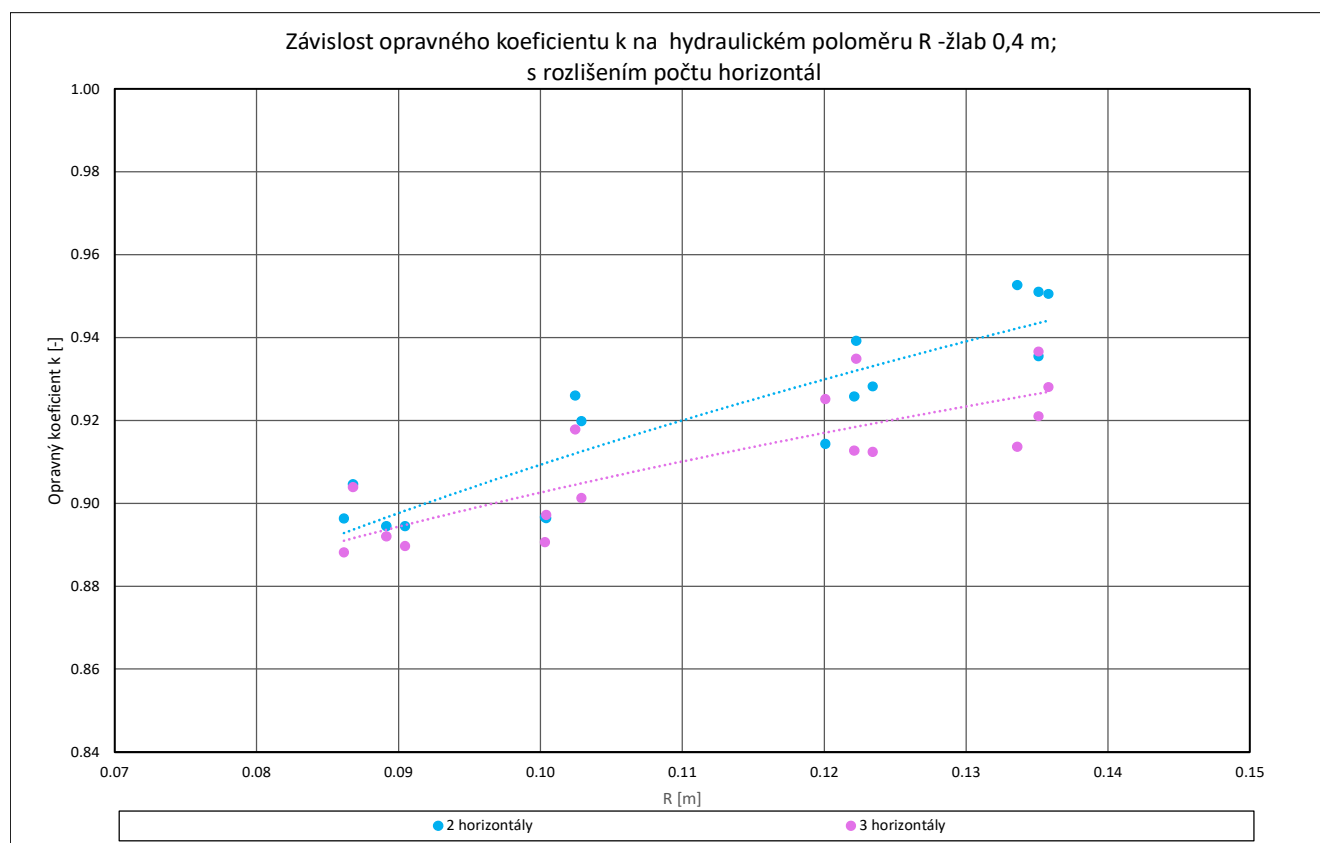
n – počet měření.

7 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU

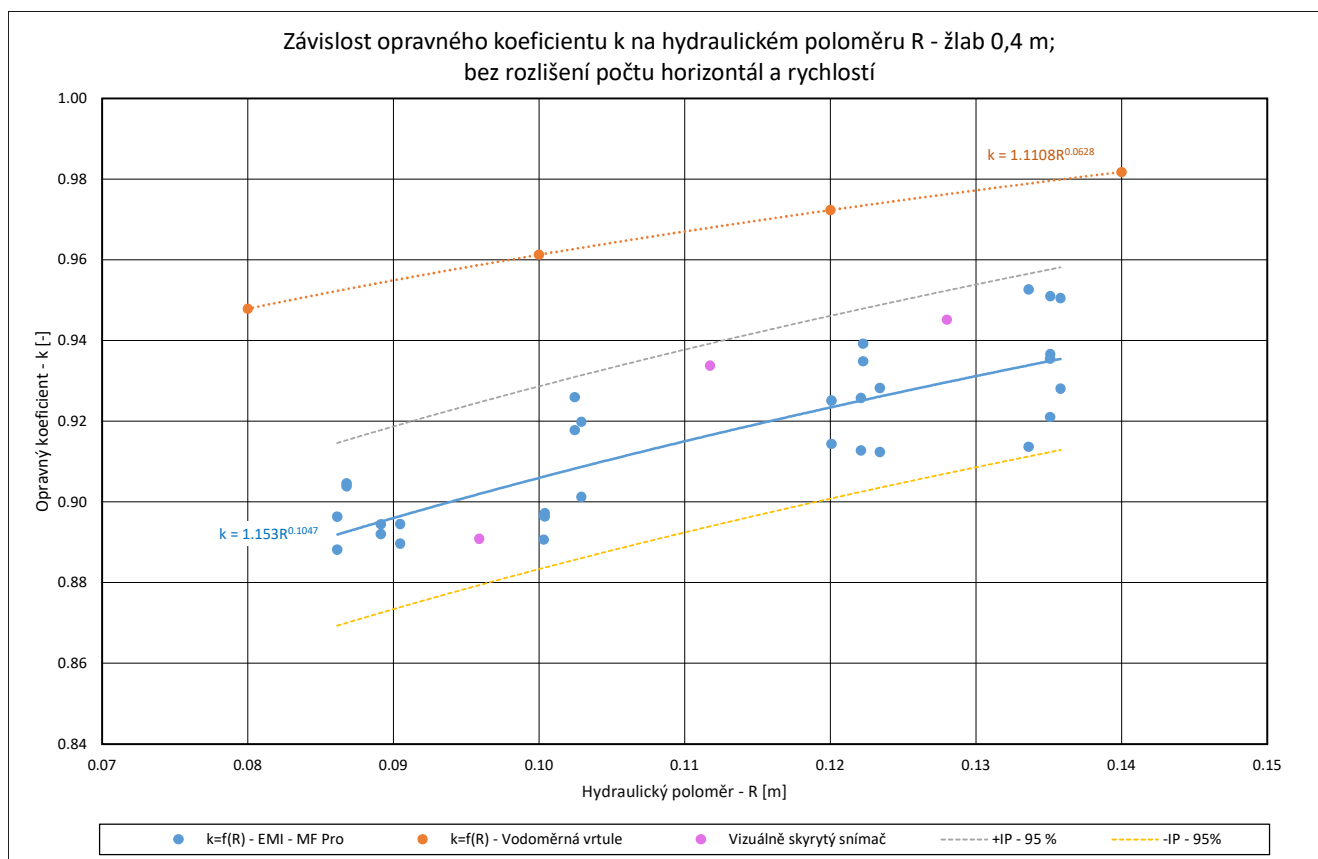
Tato kapitola se zaměřuje na shrnutí výsledků provedeného experimentálního výzkumu, konkrétně na zhodnocení výsledků opravného koeficientu k . Ten by mělo být možné, jak již bylo definované v kapitole 2.3.4.1, stanovit na základě geometrických podmínek v měrném profilu. Zhodnocení je koncipováno tak, že nejprve jsou zhodnoceny výsledky dosažené na jednotlivých žlabech, výsledky obou měřičů a poté jsou výsledky na obou žlabech vyhodnoceny společně.

7.1 OPRAVNÝ KOEFICIENT k – ŽLAB 40

Na žlabu 40 bylo provedeno celkem 16 sad měření, konkrétně 320 jednotlivých měření – 160 měření na dvou horizontálách a 160 měření na třech horizontálách. Měření bylo provedeno při hloubkách proudu od 0,10 m do 0,40 m a rychlostech o velikosti od 0,1 m/s do 0,5 m/s.



Graf 7.1 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 40, s rozlišením počtu horizontál



Graf 7.3 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R - žlab 40, bez rozlišení počtu horizontál

V grafu 7.3 jsou vyneseny všechny výsledky měření závislosti opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R pro žlab 40 bez rozlišení počtu horizontál. Zároveň je tato závislost stejně jako v předchozím grafu proložena mocninou funkcí, dále jsou v grafu vyznačeny meze $+IP$ a $-IP$. Ty představují pásy spolehlivosti pro individuální hodnotu okolo regresní funkce. Rovnice regresní funkce lze vidět v grafu 7.3 (označena modrou barvou). U žlabu 40 je hodnota IP rovna 0,023. Pokud tuto hodnotu vztáhneme k průměrné hodnotě opravného koeficientu k na řešeném intervalu a hodnotu vynásobíme 100, dostaneme přímo hodnotu relativní nejistoty na hladině spolehlivosti 95 % ve stanovení opravného koeficientu $k - p_{BK} = 2,8 \%$.

V grafu 7.3 je také uvedena rovnice regresní funkce pro stanovení opravného koeficientu pro měření s vodoměrnou vrtulí (označena oranžovou barvou). Rovnice byla určena v rámci PRM v roce 2017 [5]. Rychlost naměřená pomocí vodoměrné vrtule je o několik jednotek % blíže střední profilové rychlosti než rychlost naměřená pomocí EMI

měřidla. Tento rozdíl je nejpravděpodobněji způsoben tím, že při měření vodoměrnou vrtulí byly zvoleny odlišné dráhy pojezdu.

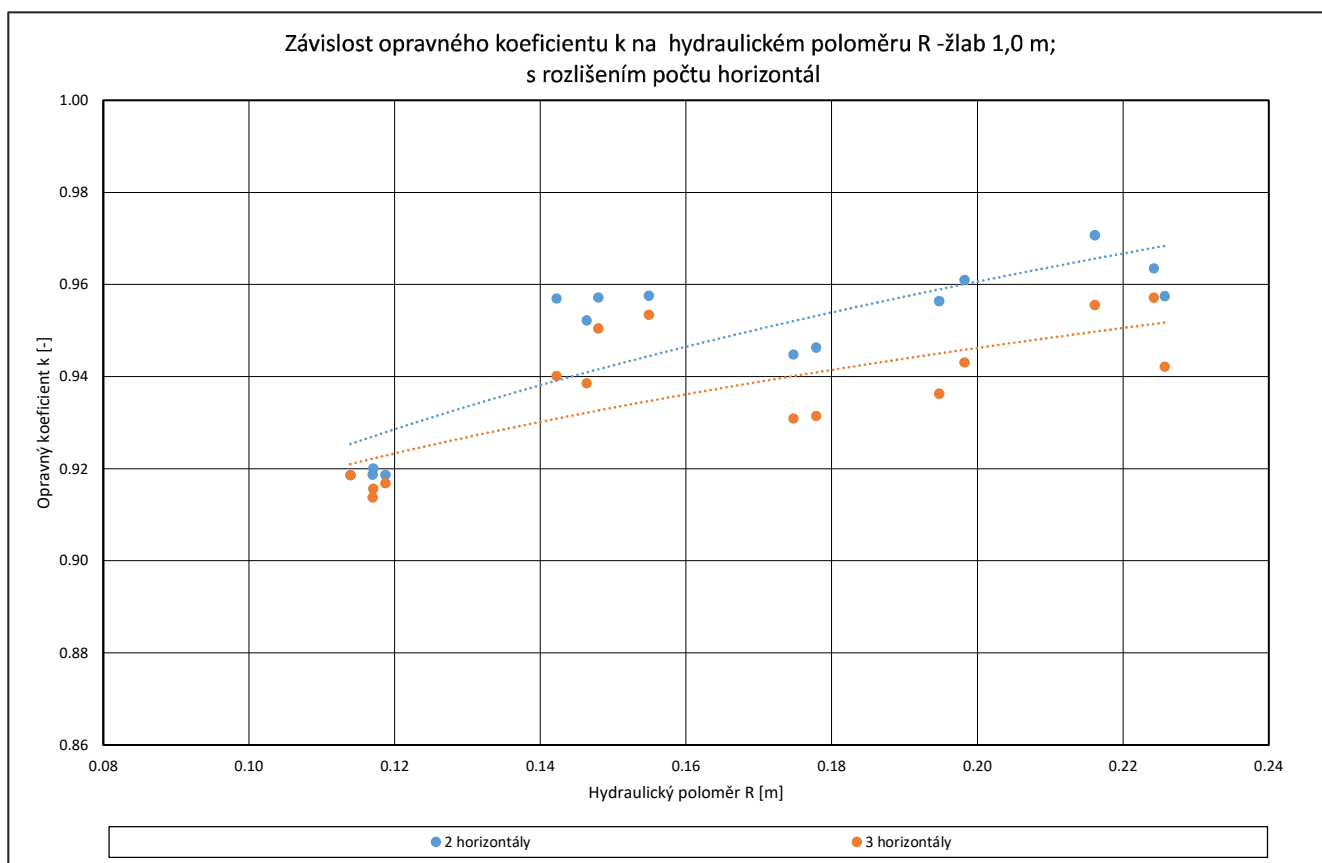
Dále jsou v grafu 7.3 vyneseny hodnoty opravného koeficientu k , které byly stanoveny při měření s vizuálně skrytým snímačem EMI měřidla. Měření s vizuálně skrytým snímačem simulovalo měření v odpadní vodě, kde není možné kontrolovat pozici snímače. Takto naměřené hodnoty bezpečně leží v pásmu spolehlivosti.

7.2 OPRAVNÝ KOEFICIENT k – ŽLAB 100

Na žlabu 100 proběhlo měření při rychlostech od 0,1 m/s do 0,5 m/s a při hloubkách od 0,10 m do 0,50 m. Celkově zde bylo provedeno 15 sad měření odpovídajících 300 jednotlivým měřením. 150 měření s posunem po 2 horizontálách a 150 měření s posunem po 3 horizontálách.

Obdobně jako u žlabu 40 byl sestrojen graf 7.4, kam byly vyneseny a barevně rozlišeny dle počtu horizontál hodnoty opravného koeficientu k v závislosti na hydraulickém poloměru R . I zde lze vidět, jak už bylo zmíněno v kapitole 7.1, že při měření na 2 horizontálách a použití plošné integrační metody vychází hodnoty opravného koeficientu k vyšší než při měření na 3 horizontálách.

Měření na žlabu 100 je časově i fyzicky náročnější než na žlabu 40, z toho důvodu došlo ke střídání měřičů i během jedné sady měření. Proto zde není podrobněji uvedeno zhodnocení porovnání výsledků jednotlivých měřičů.

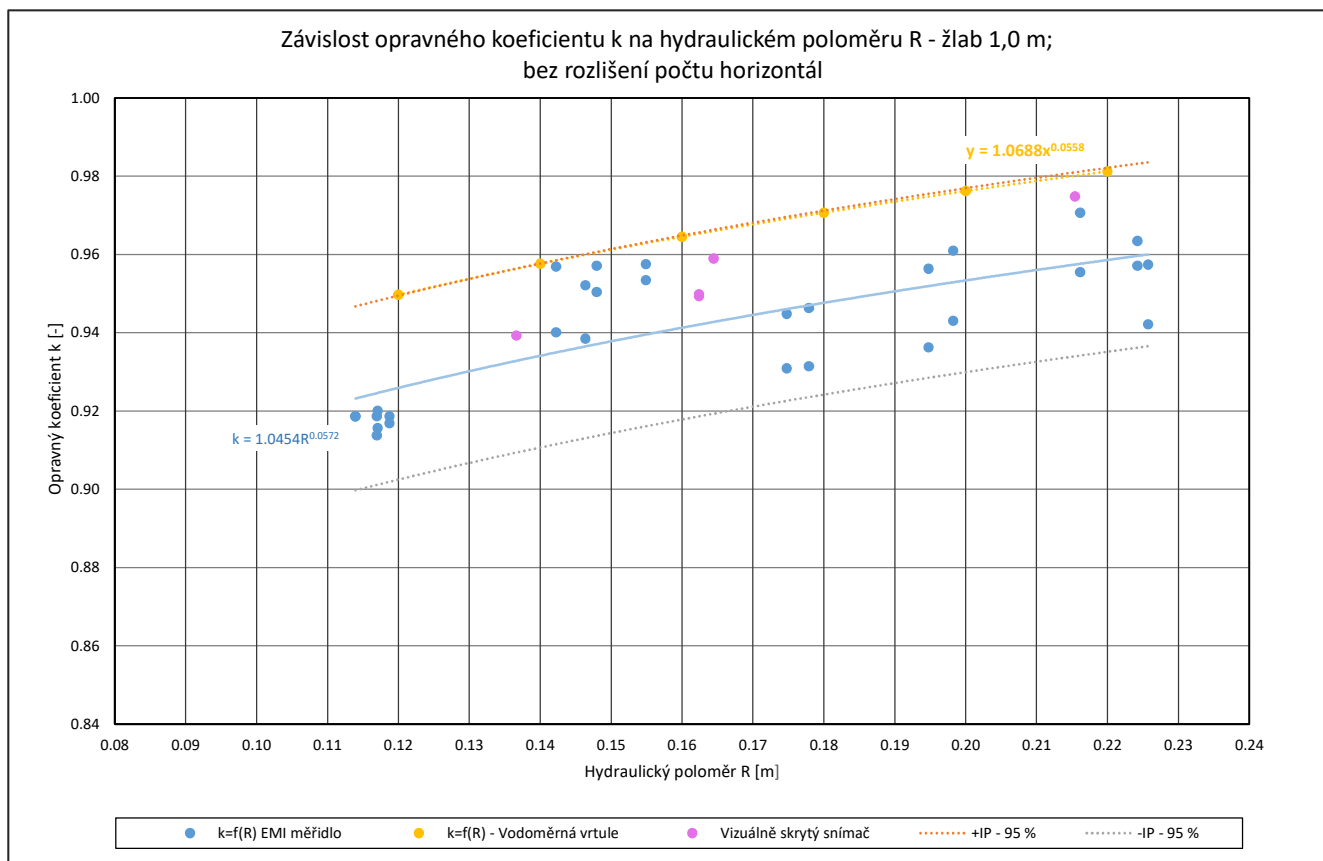


Graf 7.4 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 100, s rozlišením počtu horizontál

Stejným způsobem jako v kapitole 7.1 byl sestaven i graf 7.5, tedy graf, kde jsou vyneseny všechny hodnoty měření bez rozlišení počtu horizontál. Dále je v grafu 7.5 uvedena rovnice příslušné regresní funkce. U tohoto žlabu je hodnota IP rovna hodnotě 0,024, z ní jsme stanovili hodnotu $-p_{BK}$ identickými postupy jako v předchozí kapitole. Hodnota relativní nejistoty v tomto případě odpovídá hodnotě $p_{BK} = 2,5 \%$.

Do grafu jsou opět vyneseny hodnoty naměřené vodoměrnou vrtulí z PRM 2017 [5], je zde i oranžovou barvou zobrazena rovnice regresní funkce. Hodnoty integračně naměřené pomocí vodoměrné vrtule prakticky kopírují horní pásmo spolehlivosti $+IP$. Při porovnání hodnot s hodnotami naměřené pomocí vodoměrné vrtule, lze tedy říct, že došlo k určitému přiblížení absolutních hodnot opravného koeficientu.

Na žlabu 100 také proběhlo měření s vizuálně skrytým snímačem, i v tomto případě se naměřené hodnoty nachází v pásmu spolehlivosti.

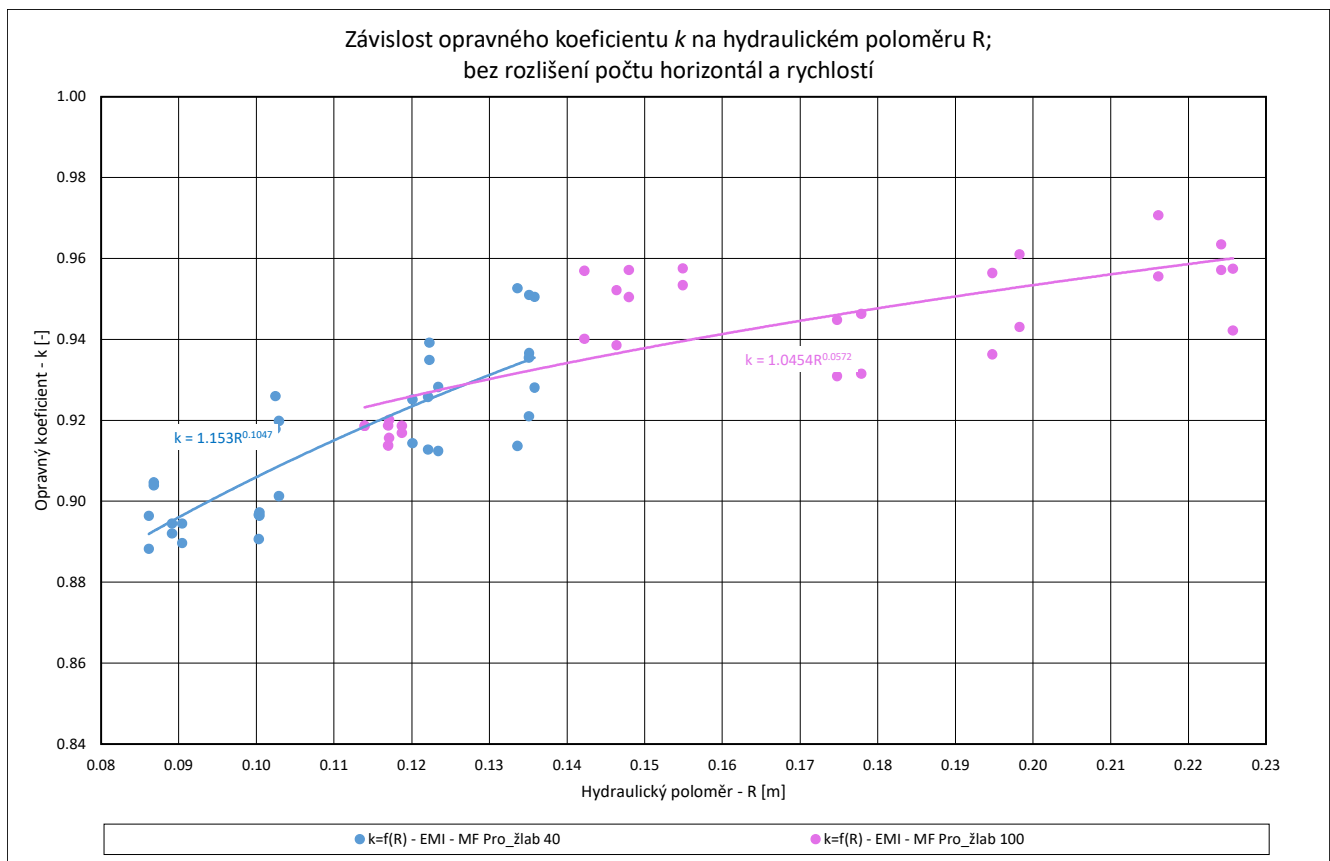


Graf 7.5 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 100, bez rozlišení počtu horizontál

7.3 CELKOVÉ VÝSLEDKY OPRAVNÉHO KOEFICIENTU k

Do grafu 7.6 je vynesena závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R , bez rozlišení počtu horizontál. Hodnoty určené na jednotlivých měrných žlabech jsou barevně rozlišeny. Výsledky z měrného žlabu 40 jsou v grafu 7.5 označeny modrou barvou a výsledky z měrného žlabu 100 jsou označeny fialovou barvou. Z grafu vyplývá, že se zvětšující se plochou měrného profilu vychází hodnoty závislosti opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R vyšší. Lze tedy říct, že obecně se zvětšujícím se měrným profilem, tedy jeho plochou, klesá vliv nutných korekcí pomocí opravného koeficientu k .

V grafu 7.6 jsou zobrazeny rovnice regresních funkcí pro oba žlaby. Při porovnání průběhů obou těchto regresních rovnic lze usuzovat na jejich jistou návaznost při vzrůstajícím hydraulickém poloměru.

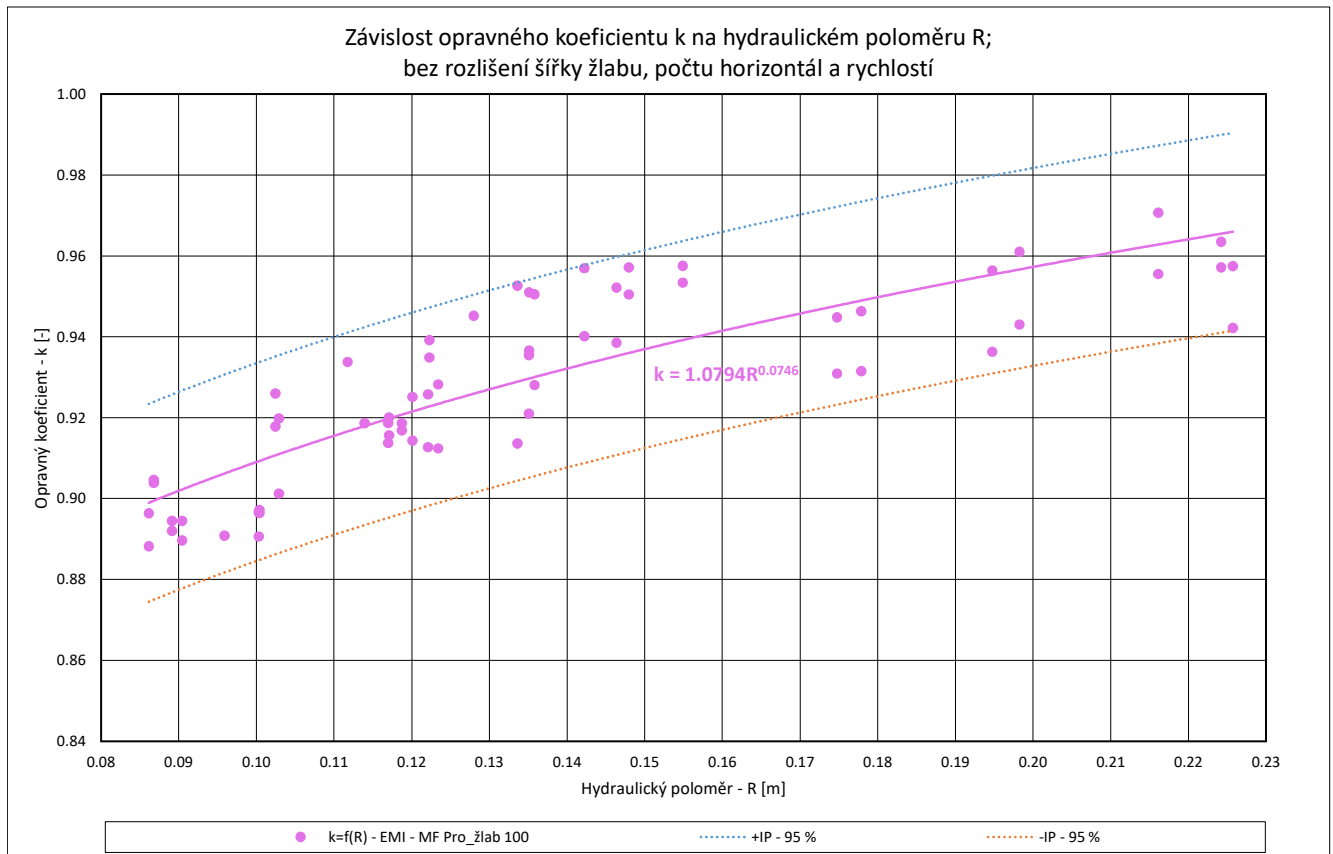


Graf 7.6 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R , bez rozlišení počtu horizontál a rychlostí

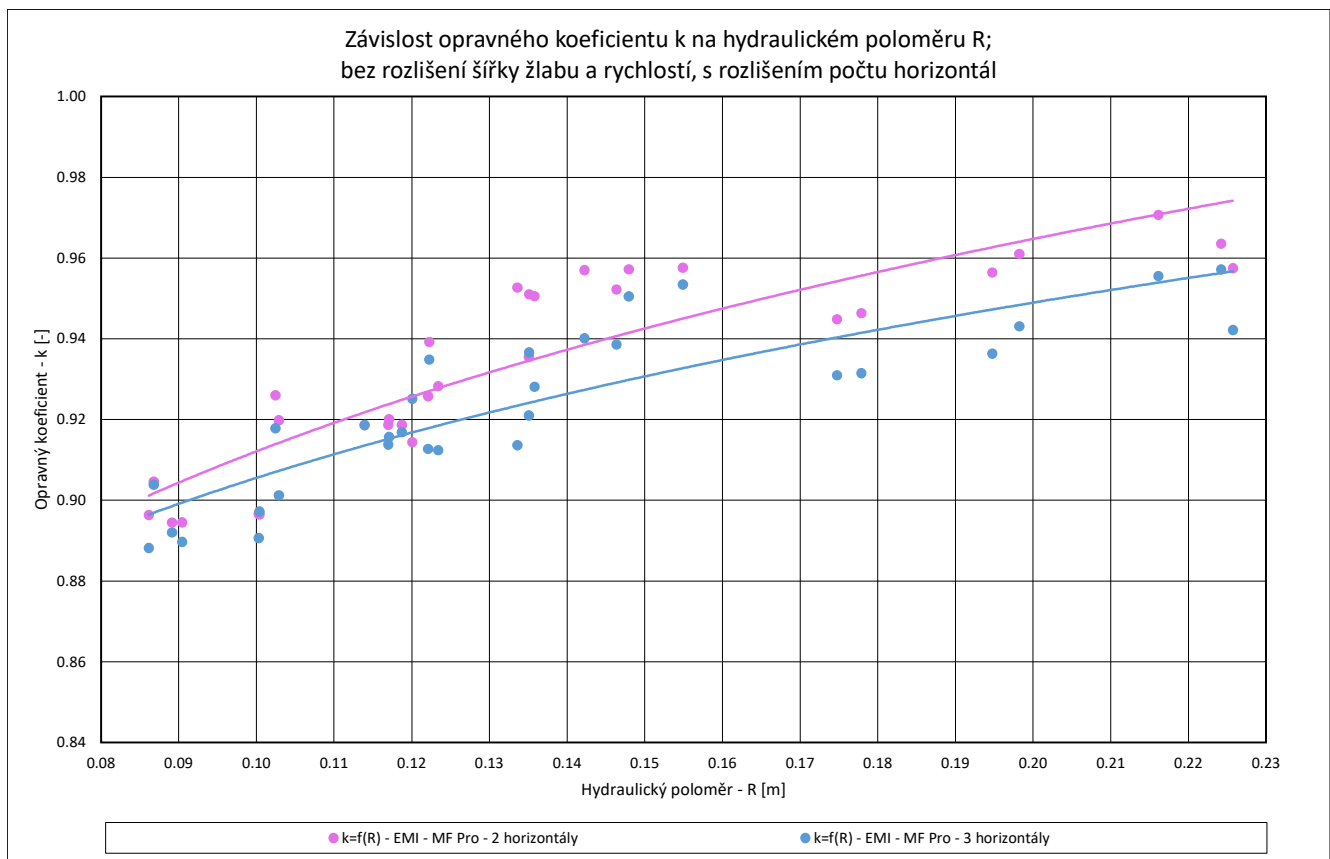
Všechny výsledky, které byly získány při měření na žlabu 40 a 100, jsou tak vyneseny do grafu 7.7, kde je sjednocen jejich průběh. V grafu je uvedena regresní funkce závislosti opravného koeficientu na hydraulickém poloměru, o které se dá říct, že je doporučitelná pro reálná měření. Do grafu jsou opět, stejně jako tomu bylo u porovnání výsledků jednotlivých žlabů v kapitolách 7.1 a 7.3, vyneseny pásy spolehlivosti platné pro individuální hodnotu. Hodnota $IP = 0,024$ je platná v celém rozsahu posuzovaného hydraulického poloměru. Stejným způsobem jako v předchozích kapitolách byla vypočtena i relativní nejistota p_{BK} , její hodnota je rovna $p_{BK} = 2,6 \%$. Při porovnání s hodnotou získanou při měření s vodoměrnými vrtulemi, kdy hodnota relativní nejistoty je rovna $p_{BK} = 3,2 \%$, lze označit hodnotu relativní nejistoty ($p_{BK} = 2,6 \%$) za příznivou.

Celková závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R bez rozlišení šířky žlabu, ale s rozlišením počtu horizontál, je vynesena do grafu 7.7. Výsledky získané při měření integrační metodou na dvou horizontálách jsou v grafu

vyznačeny fialovou barvou a výsledky při měření integrační metodou na třech horizontálách jsou vyznačeny modrou barvou. Obdobně jako v grafech 7.1, 7.4 se v grafu 7.8 uplatňuje již výše zmíněná domněnka, že při měření na dvou horizontálách nabývá opravný koeficient k vyšších hodnot, než je tomu při měření na třech horizontálách. Jinak řečeno, že při posunu EMI měřidla po dvou horizontálách je stanovená rychlost výstižnější, než je tomu při posunu po třech horizontálách.



Graf 7.7 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R , bez rozlišení šířky žlabu, počtu horizontál a rychlostí



Graf 7.8 Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R , bez rozlišení šířky žlabu a rychlostí, s rozlišením počtu horizontál

Abychom určili, zda je prokazatelná jakákoliv závislost opravného koeficientu k na vztažné rychlosti v_{lab} , vynesli jsme naměřené hodnoty do grafu 7.9. Výslednými hodnotami získanými z měření na obou žlabech je proložena spojnice trendu (v tomto případě se jedná o přímku). Z grafu lze pozorovat, že není patrná žádná významná závislost opravného koeficientu k na měřené vztažné rychlosti. Lze předpokládat, že ani při vyšších měřených rychlostech se neprojeví žádná změna uvedeného trendu. Z tohoto důvodu lze říct, že měření je vhodné i pro vyšší rychlosti.

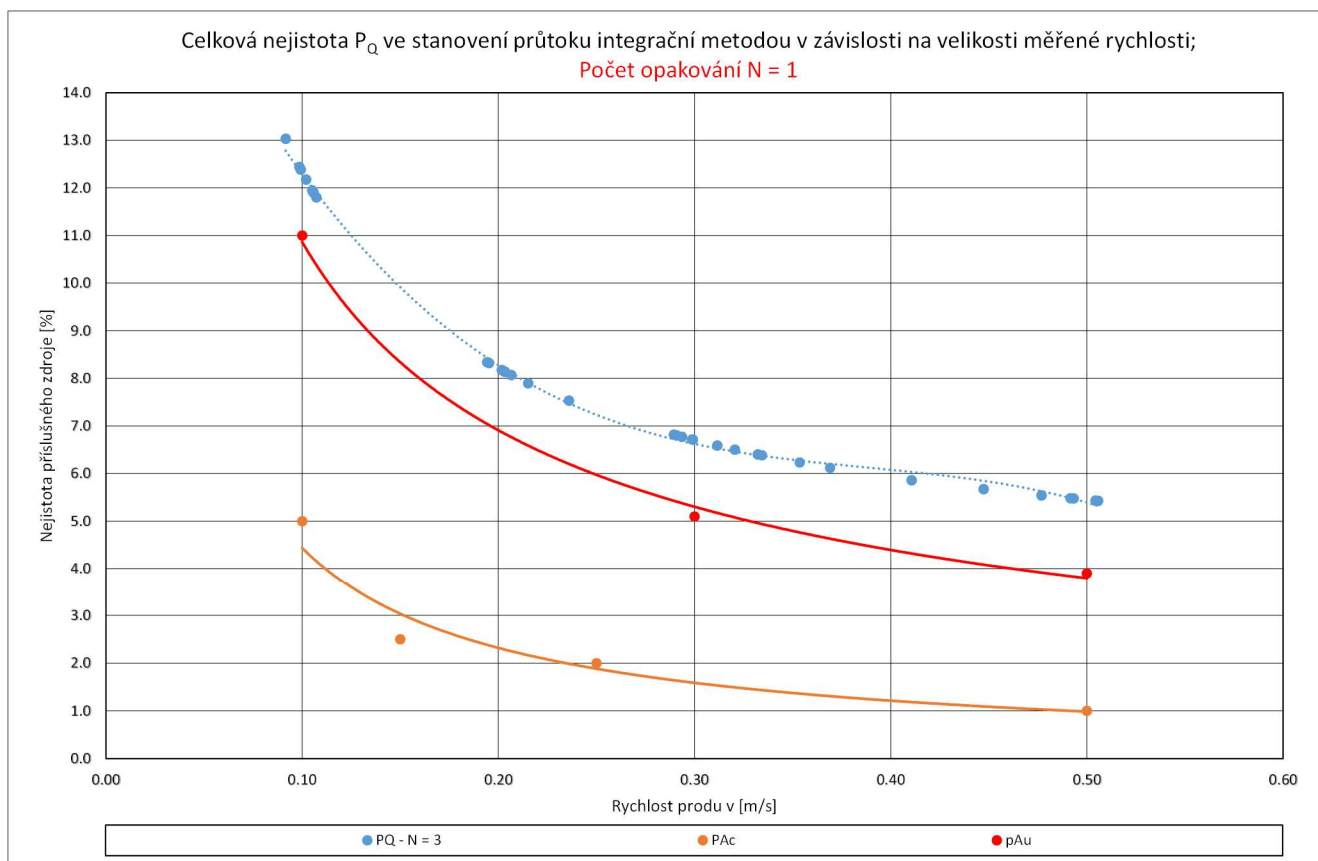
8 VYHODNOCENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘI APLIKACI PLOŠNÉ INTEGRAČNÍ METODY

Dle MP 010 [3] je pro úřední měření nutné vyhovět podmínce, že hodnota celkové nejistoty ve stanovení průtoku musí být maximálně 5 %. Z tohoto důvodu je zde uveden následující rozbor, abychom zjistili, za jakých podmínek je tento požadavek splněn.

Celková nejistota ve stanovení průtoku integrační metodou je tvořena souhrnem mnoha dílčích nejistot, jednotlivé veličiny a jejich výpočet je uveden v kapitole 5. Tato kapitola se zabývá a doplňuje informace o některých vstupních zdrojích nejistot, které mají dominantní vliv na velikost celkové nejistoty ve stanovení průtoku integrační metodou.

8.1 VYHODNOCENÍ VLIVU NEJISTOTY REPRODUKOVATELNOSTI KALIBRAČNÍCH KONSTANT EMI MĚŘIDLA p_{Ac} A NEJISTOTY VE STANOVENÍ BODOVÉ RYCHLOSTI PROUDU p_{Au}

Graf 8.1 byl sestaven pro snadnější představu výpočtu celkové nejistoty průtoku. Výpočet celkové nejistoty byl proveden na základě vztahů, které jsou uvedeny v kapitole 5. K této parametrické analýze jsme použili okrajové podmínky, které vycházejí z měření, jež jsme realizovali v laboratorních podmínkách. Do grafu jsou také vyneseny dva dominantní zdroje nejistoty stanovené způsobem A, konkrétně nejistota reprodukovatelnosti kalibračních konstant EMI měřidla p_{Ac} a nejistota ve stanovení bodové rychlosti proudu p_{Au} .



Graf 8.1 Celková nejistota ve stanovení průtoku integrační metodou v závislosti na velikosti měřené rychlosti; počet opakování $N=1$

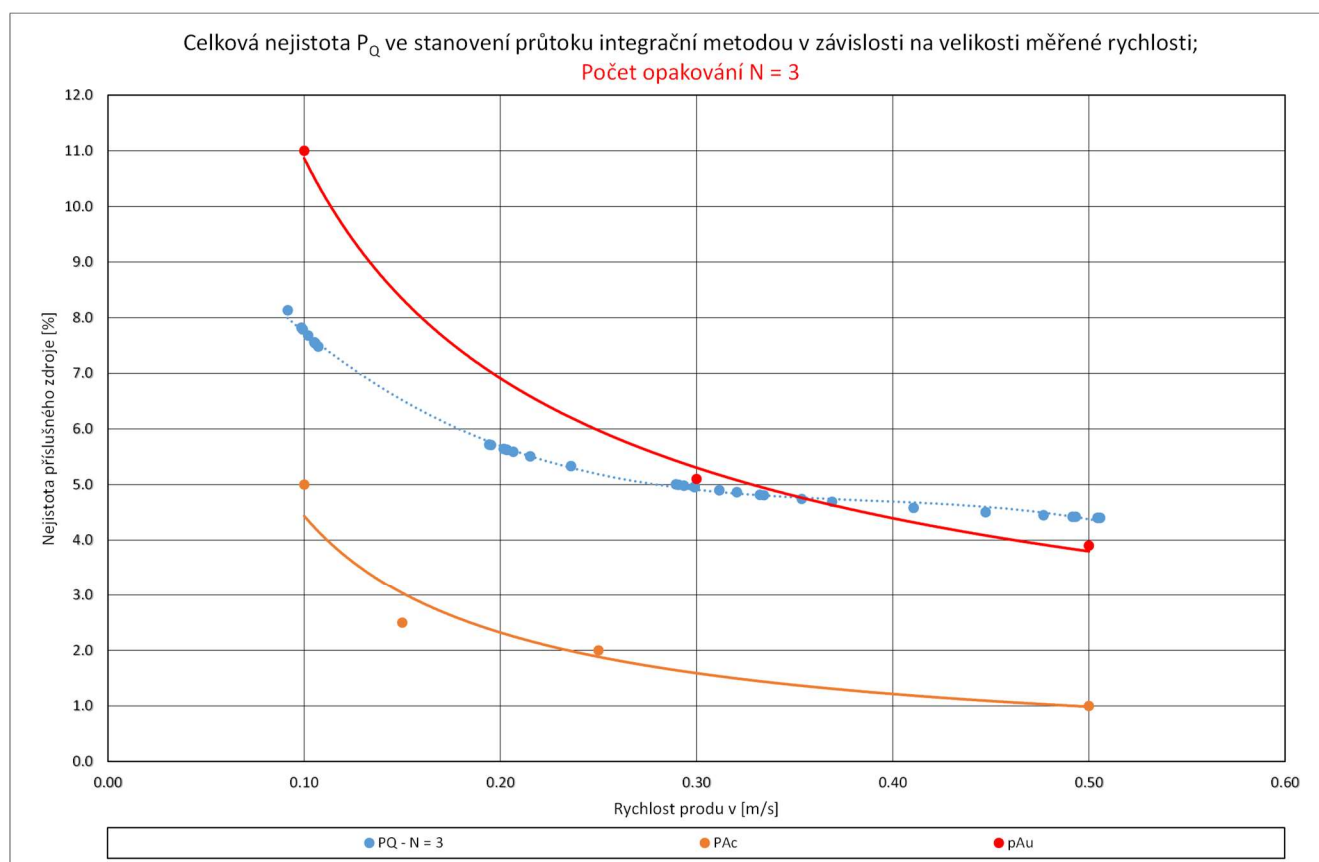
Graf 8.1 byl sestaven tak, že bylo předpokládáno, že integrační měření bylo prováděno pouze jedenkrát, tedy $N=1$ a čas měření je roven 60 s nebo je delší.

Z grafu je patrné, že při nízkých rychlostech roste vliv nejistoty z reprodukovatelnosti kalibračních konstant EMI měřidla. Lze tedy říct, že integrační metoda je velmi citlivá v oblasti malých rychlostí. Pokles průběhu nejistoty v závislosti na měřené rychlosti je poměrně strmý a při rychlostech větších než 0,25 m/s dosahuje hodnot 2 %. Tuto nejistotu lze snížit počtem opakování, což je patrné z grafu 8.2.

Dalším dominantním zdrojem je nejistota ve stanovení bodové rychlosti proudu. Z grafu 8.1 je prokazatelné, že vliv této nejistoty je větší než vliv nejistoty z reprodukovatelnosti kalibračních konstant EMI měřidla.

Hodnoty vynesené v grafu 8.1 odpovídají době měření 60 s, což je minimální hodnota pro měření uvedená v [3]. I přesto, že měření byla prováděna v požadované délce 60 s, nejsou výsledné hodnoty celkové nejistoty průtoku dostatečně nízké (pod 5 %). Abychom splnili požadovanou podmínku, že hodnota celkové nejistoty bude

nižší než 5 %, pak bychom mohli měřit až od rychlosti 0,5 m/s a vyšších. Z tohoto plyne, že jedním z efektivních způsobů snížení celkové nejistoty měření je zajistit dostatečný počet opakování N příslušných měření.



Graf 8.2 Celková nejistota ve stanovení průtoku integrační metodou v závislosti na velikosti měřené rychlosti; počet opakování $N=3$

V grafu 8.2 je obdobně jako v grafu 8.1 zobrazena celková nejistota ve stanovení průtoku, ovšem s tím rozdílem, že měření je třikrát zopakováno $N=3$. Z grafu je patrné, že při rychlostech od 0,25 m/s se hodnota nejistoty pohybuje na úrovni obvykle požadovaných v [3] 5 %.

8.2 VYHODNOCENÍ NEJISTOTY OPRAVNÉHO KOEFICIENTU k

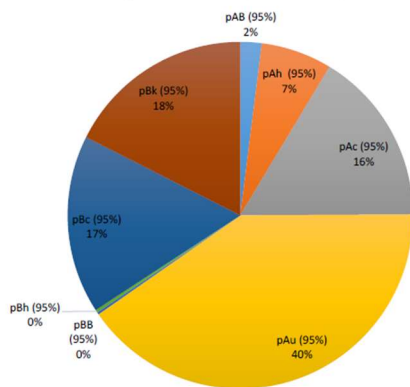
Jak je uvedeno výše, konkrétně v kapitolách 7.1 a 7.2, hodnoty nejistoty p_{BK} jsou rovny hodnotám 2,8 % pro žlab 40 a 2,5 % pro žlab 100. Obě získané hodnoty jsou téměř identické. Pro praktické měření lze doporučit hodnotu nejistoty 2,6 %. Pro jiné šířky prizmatických pravouhlých žlabů v uvedeném rozsahu lze tuto hodnotu bezpečně použít.

8.3 BILANČNÍ ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ CELKOVÉ NEJISTOTY PRŮTOKU STANOVENÉHO PLOŠNOU INTEGRAČNÍ METODOU

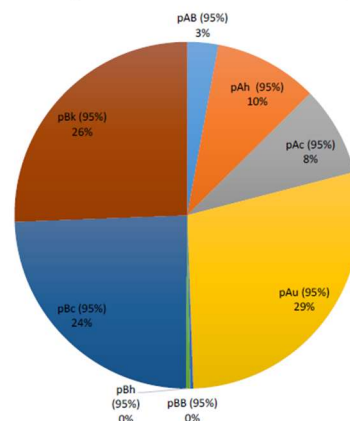
Z naměřených dat byly sestrojeny bilanční grafy 8.3, které zobrazují vliv jednotlivých nejistot měření. Na grafech 8.3 lze pozorovat vliv třech dominantních zdrojů především v závislosti na měřené rychlosti, konkrétně p_{Ac} , p_{Au} a p_{Bk} . U zdrojů nejistot p_{Ac} a p_{Au} si lze všimnout, že se se zvyšující rychlostí jejich hodnota zmenšuje. Současně si lze povšimnout, že zdroj nejistoty p_{Bk} hraje u celkové nejistoty taktéž velkou roli.

Hodnota nejistoty p_{Bc} také stojí za povšimnutí, hodnota této nejistoty je rovna 2,5 % a je převzata z kalibračního listu EMI měřidla (v tomto případě po kalibraci v Akreditované kalibrační laboratoři v Bratislavě). Hodnotu této nejistoty není možné z pozice měřiče žádným způsobem ovlivnit.

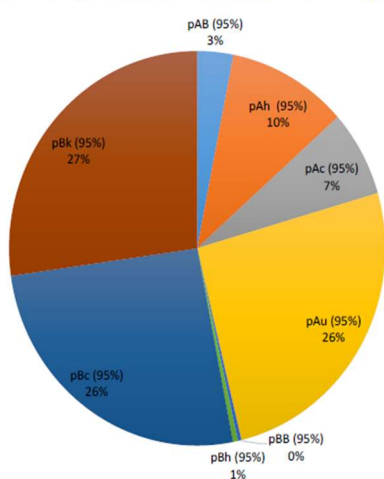
Celková nejistota PQ = 7,6 %, N = 3, v = 0,1 m/s



Celková nejistota PQ = 4,9 %, N = 3, v = 0,3 m/s



Celková nejistota PQ = 4,6 %, N = 3, v = 0,5 m/s



p_{Ab} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu;

p_{Ah} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky;

p_{Ac} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení kalibračních konstant EMI měřidla;

p_{Au} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu;

p_{BB} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu;

p_{Bh} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky;

p_{Bc} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační závislosti měřidla rychlosti vodního proudu;

p_{Bk} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení opravného koeficientu.

Graf 8.3 Bilanční grafy celkové nejistoty ve stanovení celkové nejistoty pro tři různé rychlosti a počtu opakování N=3

9 ZÁVĚR

Cílem výzkumu provedeného v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně bylo stanovit hodnotu opravného koeficientu k při vyjádření střední profilové rychlosti (průtoku) a to z měření provedených pomocí plošné integrační metody na měrných žlabech se jmenovitými šířkami 0,4 m a 1,0 m.

Celý výzkum se ukázal jako časově náročný, provedlo se celkem 620 měření plošnou integrační metodou.

Získané výsledky potvrdily nutnost použití opravného koeficientu při stanovení střední profilové rychlosti. Hodnota opravného koeficientu by neměla překročit hodnotu 1. Pomocí výzkumu byla zjištěna závislost opravného koeficientu k na geometrických poměrech definovaných hydraulickým poloměrem R . Překvapivě se nepotvrdila závislost opravného koeficientu na hodnotě měřené rychlosti.

Součástí práce jsou i kapitoly, které se zabývají určením a zhodnocením nejistoty ve stanovení průtoku za pomoci integrační metody. Zároveň jsou zde identifikovány dílčí nejistoty, které jsou při určení celkové nejistoty dominantní.

Z celého výzkumu lze doporučit, že pro stanovení střední profilové rychlosti při využití plošné integrační metody je nutné:

- zajistit a během měření kontrolovat rovnoměrnost pohybu snímače měřidla po celé dráze posunu v celém měrném profilu;
- volit rychlost posunu tak, aby byla dodržena předchozí zásada a současně zajistit, aby doba měření byla alespoň 60 s;
- zopakovat minimálně třikrát měření, které probíhá při průřezových rychlostech vyšších než 0,25 m/s;

Výzkum potvrdil, že při využití plošné integrační metody se EMI měřidlo ukázalo jako měřidlo vhodné k úřednímu měření.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Zákon č.505/1990 Sb., o metrologii
- [2] ČSN ES ISO 748 Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí a plováků. Český normalizační institut, Praha 2001, 2008, 2022
- [3] Metrologický předpis MP 010 – Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou – postup pro provádění úředního měření metodou rychlostního pole, objemovou metodou, vážicí metodou, přenosnou měřicí sestavou s průtokoměrem, měrnými přelivy a žlaby, Brno 3/2021
- [4] Němeček, P. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, o. s., 2008
- [5] Žoužela, M., Šulc, J., Zubík, P.: Využití integrační metody rychlostního pole pro úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou. Program rozvoje metrologie 2017 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná práce, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017
- [6] Žoužela, M., Zubík, P., Vítů, M.: Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření. Program rozvoje metrologie 2020 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii, a státní zkušebnictví. Výzkumná práce, LVV – FAST – VUT v Brně, 2020
- [7] Žoužela, M., Zubík P., Burdová, L., Jechová, A.: Využití plošné integrační metody rychlostního pole pro úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou při použití EMI měřidel. Program rozvoje metrologie 2022 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii, a státní zkušebnictví. Výzkumná práce, LVV – FAST – VUT v Brně, 2022
- [8] Sýkora, L. Diplomová práce – Zhodnocení integrační metody pro stanovení průměrné rychlosti na svislicích v prizmatických korytech, VUT v Brně, 2003
- [9] Unčovský, O. Diplomová práce – Zhodnocení integrační metody pro stanovení průřezové rychlosti v prizmatických korytech, VUT v Brně, 2003
- [10] OTT MF Pro Manual – manuál výrobce, 07/2012
- [11] *White paper OTT MF Pro* [online]. 2015 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.ott.com/download/ott-mf-pro-white-paper/>
- [12] OTT Qliner 2. OTT – Hydromet [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.ott.com/>

- [13] ŽOUŽELA, M. *Vodní hospodářství: Hydraulické okruhy laboratoře Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v Brně* [online]. 06/2010n. I. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/archiv-rocnik-2010/>
- [14] Automa [online].2016. 2013 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://automa.cz>
- [15] Volba nejlepší spojnice trendu pro vaše data. In: *Microsoft.support* [online]. 2019 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://support.microsoft.com/cs-cz/office/volba-nejlep%C5%A1%C3%AD-spojnice-trendu-pro-va%C5%A1e-data-1bb3c9e7-0280-45b5-9ab0-d0c93161daa8>

11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Popis	Jednotka
α	kalibrační konstanta vodoměrné vrtule	[-]
β	kalibrační konstanta vodoměrné vrtule	[-]
a, b	konstanty	[-]
b	šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu	[m]
B_{lab}	šířka průtočného profilu	[m]
h	hloubka svislicového nebo mezisvislicového pásu	[m]
i	pořadový index	[-]
IP	hladina spolehlivosti pro individuální hodnotu	[-]
k	opravný koeficient	[-]
k_{reg}	opravný koeficient vypočtený z regresní rovnice	[-]
k_U	koeficient rozšíření	[-]
k_{UA}	bezpečnostní faktor	[-]
m	počet svislicových nebo mezisvislicových pásů	[-]
n	frekvence otáčení propeleru	[-]
n	počet měření parametru X	[-]
O_{lab}	omočený obvod	[m]
p_{Ab}	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu	[-]
p_{Ac}	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení kalibračních konstant měřidla	[-]
p_{Ah}	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky vody	[-]
p_{AQ}	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení průtočného množství	[-]
p_{Au}	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu	[-]
$p_{a\bar{v}}$	relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení průměrné rychlosti na svislici	[-]
p_{AY}	relativní standardní nejistota určená způsobem A	[-]

p_{BB}	relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky profilu	[-]
p_{Bc}	relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační závislosti měřidla	[-]
p_{Bh}	relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky vody	[-]
p_{Bk}	relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení opravného koeficientu integrační metody	[-]
p_{BQ}	relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení průtočného množství	[-]
p_{BY}	relativní standardní nejistota určená způsobem B	[-]
p_Q	relativní rozšířená kombinovaná nejistota při stanovení průtoku	[-]
p_x	relativní směrodatná odchylka parametru X	[-]
$p_{\bar{x}}$	relativní směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X	[-]
t_a	kritická hodnota Studentova rozdělení	[-]
t	doba měření	[s]
Q	průtočné množství	[m ³ .s ⁻¹ ; l.s ⁻¹]
R_{lab}	hydraulický poloměr	[m]
$s_{\bar{x}}$	směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X	[x*]
S	plocha průtočného průřezu	[m ²]
u_A	standardní nejistota stanovená způsobem A	[x*]
u_{AY}	standardní nejistota stanovená způsobem A funkce Y	[x*]
u_B	standardní nejistota stanovená způsobem B	[x*]
u_{BY}	standardní nejistota stanovená způsobem B funkce Y	[x*]
V	objem proteklé vody	[m ³]
v	profilová rychlost	[m/s]
\bar{v}	průměrná rychlost na svislici	[m/s]
\bar{v}	průřezová rychlost proudění	[m/s]
v_{int}	rychlost stanovená integrační metodou	[m/s]
X	měřený parametr	[-]

\bar{x}	průměr měřených parametrů x	[-]
Y	funkce závisující na vzájemně nezávislých parametřů	[-]
\hat{y}	odhadnutá hodnota funkce Y	[-]
z_x	rozsah odchylek	[x*]
$\frac{\partial Y}{\partial X}$	parciální derivace	[-]

Poznámka: [x*] jednotka vždy odpovídá příslušnému měřenému parametru.

12 SEZNAM PŘÍLOH

- P.1.** Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 40; bez rozlišení počtu horizontál a rychlostí.
- P.2.** Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R – žlab 100; bez rozlišení počtu horizontál a rychlostí.
- P.3.** Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R ; bez rozlišení počtu horizontál a rychlostí.
- P.4.** Závislost opravného koeficientu k na hydraulickém poloměru R ; bez rozlišení šířky žlabu, počtu horizontál a rychlostí.
- P.5.** Závislost opravného koeficientu k na vztažné rychlosti v_{lab} ; bez rozlišení šířky žlabu a počtu horizontál.
- P.6.** Celková nejistota PQ ve stanovení průtoku integrační metodou v závislosti na velikosti měřené rychlosti – žlab 40. Počet opakování $N=3$.
- P.7.** Celková nejistota PQ ve stanovení průtoku integrační metodou v závislosti na velikosti měřené rychlosti – žlab 100. Počet opakování $N=3$.
- P.8.** Celková nejistota PQ ve stanovení průtoku integrační metodou v závislosti na velikosti měřené rychlosti bez rozlišení šířky žlabu. Počet opakování $N=3$.