



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VLIV RYCHLOSTI POSUVU ELEKTROMAGNETICKÝCH INDUKČNÍCH MĚŘIDEL NA VYKAZOVANOU RYCHLOST PROUDĚNÍ VODY

THE INFLUENCE OF THE DISPLACEMENT SPEED OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION METERS ON THE REPORTED WATER FLOW RATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lenka Burdová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodních staveb
Studentka: **Lenka Burdová**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Zubík, 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:

Vliv rychlosti posuvu elektromagnetických indukčních měřidel na vykazovanou rychlost proudění vody

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plynulý posuv měřidla bodové rychlosti vodního proudu je využíván při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole. Metoda je podrobně prozkoumána při použití vodoměrných vrtulí. Pro obdobné použití elektromagnetických indukčních měřidel zatím není dostatek poznatků. Úkolem studenta bude experimentálně zjistit vliv rychlosti posuvu sondy elektromagnetických indukčních měřidel na stanovenou průměrnou rychlost proudění vody v příslušné svislici a horizontále a následně provést rozbor naměřených hodnot. V laboratoři ÚVS-LVV je pro tento účel k dispozici potřebné hardwarové vybavení. Cílem práce je zpřesnění měřicího procesu a interpretace naměřených hodnot.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Zjistit vliv rychlosti posuvu sondy elektromagnetických indukčních měřidel na stanovenou průměrnou rychlost proudění vody v příslušné svislici a horizontále.

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 ISO 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 4. 11. 2022

L. S.

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

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Plynulý posuv měřidla bodové rychlosti vodního proudu je využíván při stanovení průtoku plošnou integrační metodou rychlostního pole. Cílem práce je experimentálně zjistit vliv rychlosti posuvu sondy elektromagnetických indukčních měřidel na stanovenou průměrnou rychlost proudění vody v příslušné svislici a horizontále.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromagnetická indukční měřidla, rychlosti posuvu sondy, měření rychlosti proudění, měření průtoků

ABSTRACT

The continuous displacement of the point velocity meter of the water current is used in the determination of the flow rate by the surface integration method of the velocity field. The aim of the work is to experimentally determine the influence of the displacement speed of the probe of electromagnetic induction meters on the determined average speed of water flow in the respective vertical and horizontal direction.

KEYWORDS

electromagnetic induction meters, probe displacement speeds, flow velocity measurement, flow measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BURDOVÁ, Lenka. *Vliv rychlosti posuvu elektromagnetických indukčních měřidel na vykazovanou rychlost proudění vody*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv rychlosti posuvu elektromagnetických indukčních měřidel na vykazovanou rychlost proudění vody* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 3. 2023

Lenka Burdová

autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv rychlosti posuvu elektromagnetických indukčních měřidel na vykazovanou rychlost proudění vody* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 3. 2023

Lenka Burdová

autor

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlovi Zubíkovi, Ph.D. za vstřícný přístup, praktické rady v průběhu tvorby práce a pomoci při realizaci měření. Dále děkuji panu Ing. Michalovi Žouželovi, Ph.D. za poskytnuté podklady a rady.

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	MOTIVACE K MĚŘENÍ	5
3	MĚŘENÍ PRŮTOKU V OTEVŘENÝCH KORYTECH	7
3.1	OBJEMOVÁ METODA	7
3.1.1	Metoda konečného objemu.....	7
3.1.2	Obecná metoda	8
3.1.3	Vážicí metoda	8
3.1.4	Použití přenosné měřicí sestavy.....	9
3.2	POUŽITÍ MĚRNÝCH PŘELIVŮ A ŽLABŮ	10
3.3	METODY RYCHLOSTNÍHO POLE	11
3.3.1	Bodová metoda.....	12
3.3.2	Plošná integrační metoda.....	14
3.3.3	Pruhová metoda	15
3.3.4	Ostatní metody	15
3.3.5	Měřidla pro měření rychlosti proudění	17
4	VYHODNOCENÍ PRŮTOKU	26
4.1	GRAFICKÁ METODA	26
4.1.1	Integrace hloubka- rychlost (metoda rozdělení rychlostí)	26
4.1.2	Integrační metoda rychlostního pole (metoda rychlostního profilu)	26
4.2	ARITMETICKÉ METODY	27
4.2.1	Metoda svislicových pásů.....	27
4.2.2	Metoda mezisvislicových pásů.....	28
4.3	OSTATNÍ METODY	29
4.3.1	Metoda nezávislé svislice	29
4.3.2	Metoda horizontálních rovin	29
5	NEJISTOTY MĚŘENÍ PODLE ČSN ISO 748	30
5.1	STANDARDNÍ NEJISTOTA URČENÁ ZPŮSOBEM A	31
5.2	STANDARDNÍ NEJISTOTA URČENÁ ZPŮSOBEM B	31
5.2.1	Rozdělení zdrojů nejistot typu B.....	32
5.2.2	Postup určení standardní nejistoty stanovené způsobem B	32
5.3	Gaussovo normální rozdělení	34
5.4	Směrodatná odchylka	34
6	NEJISTOTA MĚŘENÉHO PRŮTOKU PŘI UŽITÍ METODY RYCHLOSTNÍHO POLE	36
6.1	URČENÍ NEJISTOTY STANOVENÉ ZPŮSOBEM A	36

6.1.1	Nejistota stanovená způsobem A- měření průřezové rychlosti (průtoku) při užití plošné integrační metody	37
6.1.2	Popis dílčích složek nejistoty	38
6.2	URČENÍ NEJISTOTY STANOVENÉ ZPŮSOBEM B	41
6.2.1	Nejistota stanovená způsobem B- měření průřezové rychlosti (průtoku) při užití plošné integrační metody	42
6.2.2	Popis dílčích složek nejistoty	42
7	LABORATORNÍ VÝZKUM.....	45
7.1	CÍL PRÁCE	45
7.2	POUŽITÁ EMI MĚŘIDLA	45
7.3	VYUŽITÉ LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ.....	46
7.4	POSTUP MĚŘENÍ.....	48
7.4.1	Traverzační zařízení	50
7.4.2	Program Integrace.....	52
7.5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	53
7.5.1	Spojnice trendu	53
7.5.2	Měřidlo <i>MF pro</i>	53
7.5.3	Měřidlo <i>Flo-Mate 2000</i>	55
7.5.4	Porovnání obou měřidel	57
7.6	VYHODNOCENÍ směrodatné odchylky měření	63
7.6.1	Měřidlo <i>MF pro</i>	63
7.6.2	Měřidlo <i>Flo-mate 2000</i>	65
7.6.3	Porovnání obou měřidel	68
8	ZÁVĚR	71
9	POUŽITÁ LITERATURA.....	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

1 ÚVOD

Pro měření průtoku v otevřených korytech a kanálech existuje několik metod. Všechna měření by měla být prováděna podle platných norem a předpisů. Pro měření v otevřených korytech se jedná zejména o normu ČSN EN ISO 748– Měření průtoku kapalin v otevřených korytech a MP 010- Metrologický předpis pro úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou.

Norma ČSN EN ISO 748 se zabývá především určením průtoku v otevřených korytech. Jsou v ní zpracovány principy metod měření, postupy pro měření šířky, hloubky, rychlosti a následné vyhodnocení průtoků a chyb měření. Metrologický předpis 010 se zabývá problematikou úředního měření a posuzováním vhodnosti měřidel k tomuto účelu a následném vyhodnocení chyb měření těmito měřidly. Hlavním rozdílem mezi ČSN EN ISO 748 a MP 010 je, že MP 010 je určena pro měření průtoků na profilech o menších šířkách (např. výustě z ČOV), kdežto ČSN EN ISO je určena pro měření na tocích.

Pro měření průtoku v otevřených korytech a kanálech lze použít několik typů měřidel. Mezi nejjednodušší metodu patří měření plovákem. Tato metoda je zároveň nejstarší a v dnešní době je využívána zejména při měření extrémních stavů, tj. povodní. Jako další lze využít vodoměrné vrtule. Tato měřidla jsou taktéž poměrně stará, ale stále často používána. Vodoměrné vrtule se nazývají propelery a nejčastěji používanými propelery jsou propelery typu 3, 4, 5 a 6. Další a poměrně novou skupinou měřidel vhodných pro měření v otevřených korytech jsou elektromagnetická indukční měřidla (EMI). EMI měřidla fungují na principu elektromagnetické indukce a Faradayova zákona. Indukované napětí převádějí na rychlost proudění. Poslední a nejnovější skupinou měřidel používaných pro měření průtoku v otevřených korytech jsou ultrazvuková měřidla. Tato měřidla fungují na principu ultrazvuku, kdy se měří doba mezi vysláním a znovu zachycením vyslané vlny. Z toho je následně dopočítána rychlost proudění. Pro úřední měření lze ale podle MP 010 použít pouze vodoměrné vrtule.

Měření průtoku lze provádět několika způsoby. Mezi základní metody se řadí metoda rychlostního pole, která se dělí na metodu bodovou a metodu integrační. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je značný. Bodová metoda vychází z bodových měření na předem daných svislicích. Tato metoda je sice časově náročnější, ale lépe postihne rozložení rychlosti v průtočném profilu. Integrační metoda naopak vychází z přímého měření po celém průtočném profilu, kdy je měřidlem pohybováno po předem daných vertikálách a

horizontálách. Tato metoda je časově méně náročná, ale díky měření přes celý profil najednou ztrácíme informace o rozložení rychlosti v něm. Pro měření průtoků v přirozených korytech, kde průtok není nijak regulován, a je tedy v čase nestabilní, je ale vhodnější, protože průtočné množství a výška hladiny se rychle může měnit. MP 010 dále připouští měření průtoků metodou objemovou a vážicí, které vycházejí buď z předem daného objemu nebo následného změření váhy vody, která se naakumulovala za určitý čas. Dále je také možné využít měrné přelivy a žlaby, pro které je stanovena závislost mezi výškou přepadajícího paprsku a průtokem. Tedy lze na základě výšky přepadového paprsku vypočítat průtok.

2 MOTIVACE K MĚŘENÍ

Hlavní motivací pro provedení měření bylo především ověření vhodnosti elektromagnetických indukčních měřidel pro měření průtoku v kanálech (tocích) s volnou hladinou. V době realizace měření byly jedinými povolenými měřidly pro provádění autorizovaného úředního měření dle MP 010 vodoměrné vrtule. Podle normy ČSN EN ISO 748 jsou sice povolena i jiná měřidla než vodoměrné vrtule, ale tato norma je určena pro měření především na vodních tocích o šířce několika metrů, ne na prizmatických kanálech mnohdy šířkou nepřesahujících metr. Proto se hledala měřidla fungující na jiném principu, která by pro tyto účely byla vhodná. Jedním důvodem hledáním jiných měřidel je fakt, že mnoho autorizovaných osob provádějících měření, používá i měřidla fungující na jiném principu než vodoměrné vrtule. Tato měřidla ale nemohou použít pro účely úředního měření. Celou problematikou se již dříve začal zabývat Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví a Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR. [1]

Jako skupina nástrojů vhodná pro provádění měření se jevila elektromagnetická indukční měřidla. Přinášejí totiž svým uživatelům nové možnosti měření průtoků. Dají se použít v podmínkách, kde by použití vodoměrné vrtule nebylo možné. Jedná se například o měření na stokové síti, kde je voda silně znečištěná a obsahuje nerozpuštěné části. Tyto látky, v případě že se dostanou na povrch propeleru vodoměrné vrtule, mohou znemožnit provádění měření a zároveň ovlivňují jeho správnost. Zároveň se elektromagnetická indukční měřidla dají použít i při rychlostech proudění menších než 0,1 m/s. Takovéto rychlosti proudění s vodoměrnými vrtulemi měřit nelze. Jako další případ, kdy lze využít elektromagnetických indukčních měřidel, ale nelze využít vodoměrných vrtulí, je možné uvést měření v tocích, které jsou zarostlé vegetací. Vegetace, pokud se dostane do propeleru vodoměrné vrtule, také zabraňuje provedení měření.

Další motivací bylo prozkoumání integrační metody v pravoúhlém otevřeném prizmatickém korytě při použití elektromagnetických indukčních měřidel. Měřit lze i jinými metodami, například bodovou metodou nebo zkrácenými bodovými metodami. V případě všech metod, je ale nutné udržet po celou dobu měření ustálený průtok. Což se při realizaci měření v terénu, nikoli v laboratorních poměrech, udržuje jen velmi složitě. Proto je snazší provádět měření pomocí plošné integrační metody, která oproti metodě bodové zabere méně času. [1]

Zároveň jsou v poslední době vyvíjeny čím dál větší nároky na přesnost měření. Zejména pokud se jedná o měření proteklé nebo uniklé vody z vodovodní sítě. Takováto měření jsou důležitá pro správné fakturování spotřebované vody. Dále jsou také velmi přísně kontrolovány nátoky na ČOV a odtoky z ČOV. Vody z ČOV jsou vypouštěny do recipientu, na který jsou také kladeny nároky na kvalitu vody. Vypouštěním vod z ČOV se blíže zabývá zákon č. 254/2001 Sb., O vodách. Monitoringu podléhá i odtok z průmyslových podniků. Kvalita a množství vypouštěné vody je dáno kanalizačním řádem. [1]

3 MĚŘENÍ PRŮTOKU V OTEVŘENÝCH KORYTECH

Tato kapitola je zaměřena na přiblížení metod měření, které se používají pro stanovení průtoku a rychlosti proudění vody v otevřených korytech.

3.1 OBJEMOVÁ METODA

Jedná se o jednoduchou metodu, k jejímu použití potřebujeme pouze měřič času a kalibrovanou nádobu. Zároveň představuje metodu pro přímé měření průtoku. Princip objemové metody vychází z rovnice:

$$\bar{Q} = \frac{V}{t}, \quad (3.1)$$

kde:

V - zachycený objem [m^3],

t - čas [s],

\bar{Q} - hledaný průtok [m^3/s]. [2][3]

Měření probíhá pomocí kalibrované nádoby, kdy měříme čas, za který se tato nádoba naplní. Před zahájením měření je potřeba smočít povrch nádoby. K samotnému měření jsou potřeba dva pracovníci. První zachytává vodu do nádoby a startuje a ukončuje čas. Úkolem druhého je měření doby plnění a zaznamenávání výsledků. Omezením pro použití objemové metody je průtok, který nesmí přesáhnout hodnotu 6 l/s. [2]

Dle postupu měření dělíme objemovou metodu na následující:

- metodu konečného objemu,
- metodu konečné doby plnění,
- metodu obecnou.

Přičemž v praxi jsou nejvíce využívány metody konečného objemu a metody obecná.[2]

3.1.1 Metoda konečného objemu

U metody konečného objemu je nutné před zahájením měření znát konečný objem nádoby. Samotné měření probíhá tak, že nádoba je plněna vodou, zároveň se měří čas. Na konci měření se předpokládá, že nádoba je naplněna na konečný objem. Výsledný průtok spočítáme podle rovnice:

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V}{t_i}, \quad (3.2)$$

kde

\bar{Q} - hledaný průtok [m^3/s]

V - konečný objem nádoby [m^3]

t_i - čas [s]

n - počet opakování. [2]

Nádoby o objemu do 30 dm^3 je možno použít pouze při zachycování paprsku proudu, který není ovlivněn prouděním nad měrným profilem. Také je nutné zabránit silnému provzdušňování zachycené vody v nádobě. Pokud nejsme provzdušnění schopni zabránit, použijeme pro měření průtoku metodu obecnou nebo vážicí metodu. [2]

3.1.2 Obecná metoda

Obecná metoda je podobná metodě konečného objemu. Rozdílem mezi těmito dvěma metodami je, že objem předem neznáme. Zachycený objem se odečte až po ukončení měření. Podmínkou je, že doba měření musí být minimálně 5 sekund. [2]

Výsledný průtok se spočítá podle následující rovnice:

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{t_i}, \quad (3.3)$$

kde

\bar{Q} - hledaný průtok [m^3/s]

V_i - naměřený objem [m^3]

t_i - čas měření [s]

n - počet opakování. [2]

3.1.3 Vážicí metoda

U vážicí metody je voda zachycována do vaku, proto se taky někdy nazývá metoda jímání vody do vážicího vaku. Vak je možné plnit zcela nebo jen částečně, přičemž se měří čas potřebný k naplnění objemu. Hledaný průtok získáme podle rovnice:

$$\bar{Q} = \frac{V}{t} = \frac{m}{\rho \cdot t}, \quad (3.4)$$

kde

\bar{Q} - hledaný průtok [m^3/s],

V - zachycený objem [m^3],

t - čas měření [s],

m - hmotnost zachycené vody [kg],

ρ - hustota vody [kg/m^3]. [2]

Tabulka 1- Závislost hustoty vody na její teplotě [2]

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	2	4	6	8	10	12	14	16
Hustota [kg/m^3]	999.94	999.97	999.94	999.85	999.70	999.50	999.24	998.94
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	18	20	22	24	26	28	30	32
Hustota [kg/m^3]	998.60	998.20	997.77	997.30	996.78	996.23	995.65	995.03

3.1.4 Použití přenosné měřicí sestavy

Sestava je složená z průtokoměru, odtokové a přítokové hadice a čerpadla. Čerpadlo je umístěno do nádrže, ve které musí být akumulovaný dostatečný objem vody, aby bylo možné zajistit stabilní průtok a průběh hladiny během celého měření. Jako další je nutné zamezit přítoku z jiných zdrojů do systému, aby výsledek měření nebyl nijak ovlivněn. Celý systém musí být odzdušňován. [2]

Omezením pro tuto metodu je průtok, který smí být maximálně 40 l/s. Voda protékající systémem musí mít teplotu v rozmezí od 0,1 $^{\circ}\text{C}$ až 30 $^{\circ}\text{C}$. [2]

Pokud pro měření využíváme přístroje fungující na vodivostním principu, musí mít voda vodivost minimálně 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V případě použití ultrazvukových přístrojů nesmí pevné částice obsažené ve vodě pohlcovat signál. [2]

Průtok Q_{kon} , který jsme schopni měřit, spočítáme podle rovnice:

$$Q_{kor} = \frac{V_{kon} - V_{zač}}{t} \cdot \frac{1}{\frac{Er}{100} + 1} = \frac{V_i}{t} \cdot \frac{1}{\frac{Er}{100} + 1}, \quad (3.5)$$

kde

Q_{kor} - korigovaný průtok [m^3/s],

V_{kon} - objem, který během měření proteče koncem měřeného úseku [m^3],

$V_{zač}$ - proteklý objem měřený na počátku měřeného úseku [m^3],

t - doba měření mezi začátkem a koncem měřeného úseku [s],

V_t - celkový naměřený objem [m³],

Er - relativní chyba průtokoměru stanovená kalibrací, $Er=f(Q)$. [2]

3.2 POUŽITÍ MĚRNÝCH PŘELIVŮ A ŽLABŮ

Měrné přelivy a žlaby se používají pro měření průtoku na základě vztahů mezi úrovní hladiny a průtokem, tzv. Q/h charakteristice přelivů a Q/H charakteristice žlabů. Charakteristiku daného přelivu nebo žlabu zjistíme z příslušných norem, typizačních směrnic, metrologických předpisů a kalibračních měření. Pro každý objekt tak dostaneme rovnici, pomocí které je možné na základě měřené vzduté hladiny dopočítat průtok. V měrném profilu musí být nainstalován vzdouvací objekt společně s měřidlem hloubky nebo přepadové výšky, jinak na takovém profilu není možné provádět měření. Omezením pro použití této metody je průtok 1000 l/s u měrných přelivů a 2000 l/s u žlabů. [2]

Matematicky obecně platí tyto rovnice:

$$Q = a(H + d)^b + c, \quad (3.6)$$

$$Q = a(h + d)^b + c, \quad (3.7)$$

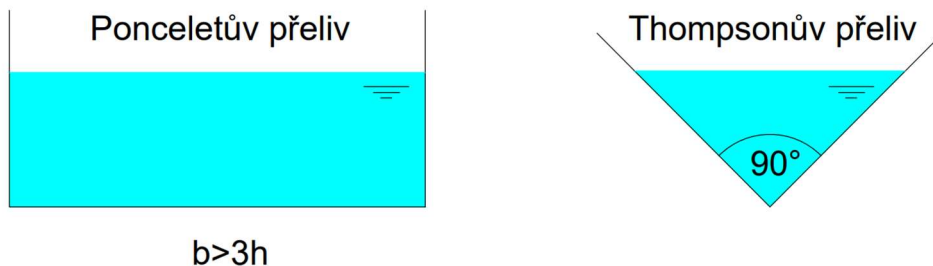
kde

H - hloubka proudu protiproudě před žlabem [m],

h - přepadová výška protiproudě před přelivem [m],

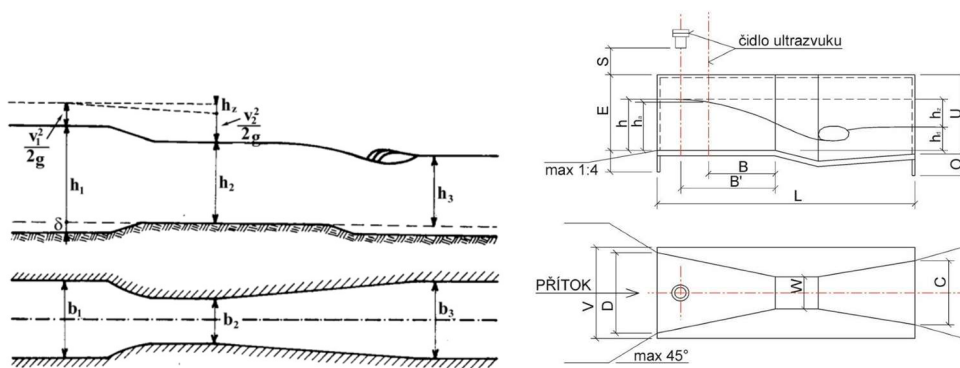
a, b, c, d - koeficienty definující příslušnou funkční závislost [-].

Mezi nejčastěji používané ostrohranné přelivy patří trojúhelníkové a obdélníkové měrné přelivy. Jako příklad trojúhelníkového přelivu lze uvést Thompsonův přeliv, jako příklad obdélníkového přelivu lze uvést Ponceletův přeliv. Trojúhelníkové přelivy se používají tam, kde dochází k velké rozkolísanosti průtoků. Naopak obdélníkové přelivy se použijí tam, kde je průtok ustálený. [4]



Obr. 1) Měrné přelivy

Měrné žlaby se do koryt instalují z důvodu zúžení průtočného profilu tak, aby došlo k přechodu z proudění říčního do proudění bystrinného. Jako příklady měrných žlabů lze uvést Venturiho a Parshallův žlab. Parshallův žlab je novější a vychází z Venturiho žlabu. [4]



Obr. 2) Venturiho (vlevo) a Parshallův (vpravo) žlab [4]

3.3 METODY RYCHLOSTNÍHO POLE

Metodu rychlostního pole lze použít jak v systémech s volnou hladinou, tak v systémech s tlakovým prouděním. Rozeznáváme dva přístupy k postupu měření- bodovou metodu a plošnou integrační metodu. Pokud k měření přistupujeme ve smyslu plošné integrační metody, pohyb měřidla může být zprostředkován ručně nebo strojně pojezdem pomocí traverzačního zařízení. [2][5][6]

Pro použití metody rychlostního pole je nutné zvolit měrný profil tak, aby se nacházel v přímé části nejlépe prizmatického koryta, aby bylo zajištěno pravidelné rozložení rychlostí po ploše měrného profilu. Místo by také mělo být vybíráno s ohledem na výskyt vírů, úplavů a podobně tak, aby se v měrném profilu tato jevy nevyskytovaly. [2]

3.3.1 Bodová metoda

K měření bodových rychlostí jsou nejčastěji využívány vodoměrné vrtule nebo EMI měřidla, blíže jsou tato měřidla popsána v kapitole 2.3.5. Pro oba typy měřidel je doporučená nejkratší doba měření stanovena na 30 sekund, avšak měření může probíhat i zkráceně. Pro vodoměrné vrtule je zkrácená doba měření 15 sekund, při použití EMI měřidel 10 sekund. V případě po sobě jdoucích několika měření se může doba měření zkrátit až na 5 sekund. Čím kratší dobu probíhá samotné měření, tím větší by měl být počet jeho opakování. [5][6]

Princip této metody pro výpočet zjištění průtoku Q spočívá v integraci přes celou plochu průřezového profilu S podle rovnice:

$$Q = \int_S f(u) dS = \iint_S f(u) dx dy , \quad (3.8)$$

kde

$f(u)$ - funkce rychlostního pole. [4,5]

Postupů pro stanovení funkce rychlostního pole je několik. Nejčastěji je využíván postup, kdy je měřena bodová rychlost u ve vhodně zvolených bodech průřezového profilu. Poté jsou hodnoty proloženy matematickou funkcí. Nejprve se provádí integrace po výšce, jako výsledek získáme průměrnou rychlost na měrné svislici v_i . Následně se integruje po šířce, výsledkem je hledaný průtok Q , který dle ČSN ISO 748 stanovíme následovně:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot v_p , \quad (3.9)$$

kde

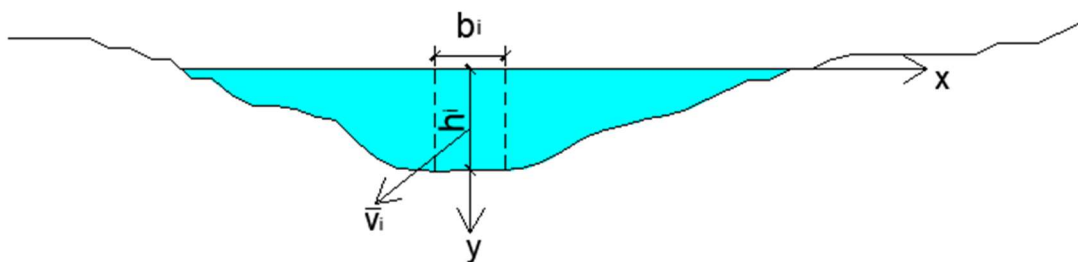
Q - hodnota průtoku [m^3/s],

b_i - šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu [m],

h_i - výška svislicového nebo mezisvislicového pásu [m],

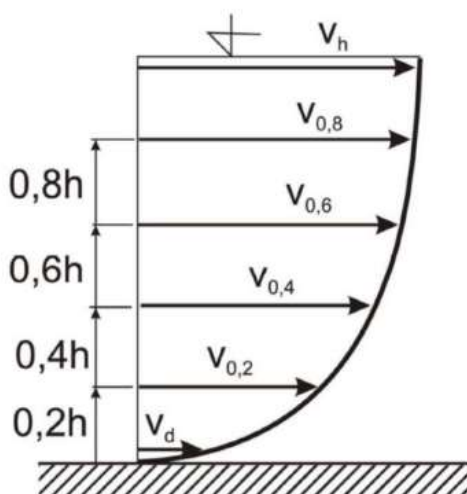
v_p - průměrná rychlost na měrné svislici [m/s],

m - počet svislicových nebo mezisvislicových pásů. [5][6]



Obr. 3) Definiční schéma

Při měření rychlosti proudění na vybraném průtočném profilu je nejprve potřeba zjistit šířku toku. K tomu se používá měřicí pásmo nebo lanko, které se napne od jednoho břehu k druhému. Podle šířky toku si průtočný profil rozdělíme na několik svislic, na kterých se následně určí body, ve kterých bude probíhat měření. Minimální počet bodů jsou dva. Body jsou voleny tak, aby z naměřených údajů bylo co nejlépe popsáno proudění v daném svislicovém pásu. Výsledná průměrná rychlost na svislici vyplývá tedy z bodových rychlostí.



Obr. 4) Příklad rozložení měrných bodů na svislici při měření rychlosti [6]

V případě, že je dno toku členité nebo některou plochou protéká více než 10 % celkového průtoku, musíme pro zvýšení přesnosti měření zvýšit počet svislic nad počet daný tabulkou 2. Dále je třeba znát hloubku. K tomu se využívá sondovací tyč nebo soutyčí s vodoměrnou vrtulí. Délka trvání bodového měření není pevně daná, ale platí, že čím déle se měří, tím přesnější výsledek dostaneme. [3]

Tabulka 2- Počet svislic v závislosti na šířce toku [2]

Šířka toku b [m]	Počet svislic
0,3	3-5
0,4	3-5
0,5	4-6
0,6	4-6
0,8	5-8
1,0	6-10

Bodové metody jsou časově náročnější, ale dosahujeme jimi přesnějších výsledků než u metody integrační. Z výsledků dokážeme lépe postihnout charakter proudění a stanovit rozložení rychlosti v daném profilu. [5][6]

3.3.2 Plošná integrační metoda

Výhodou plošné integrační metody je její, ve srovnání s bodovou metodou, menší časová nenáročnost. Proto je často využívána pro měření rychlostí proudění v otevřených korytech v terénu, kde průtok není ustálený a v čase se může rychle měnit. Mezi nevýhody integrační metody patří její menší přesnost a také ztráta informací o rozložení rychlosti proudění v daném profilu. [5][6]

Integrační metodu lze realizovat dvěma způsoby: ručně nebo strojním pojezdem. Měřidlem se pohybuje po předem určené dráze, která pokryje celou plochu měřeného profilu. Ve volbě dráhy přihlížíme na několik aspektů- tvar průřezu, deformace rychlostního pole a zkušenosti měřiče. Nejčastěji volíme dráhu v horizontálním nebo vertikálním směru podle převládajícího rozměru profilu. Pokud převládá šířka nad výškou, volíme pohyb po horizontálách. Jestliže je výška větší než šířka, volíme pohyb po vertikálách. Počet horizontál (vertikál) odvisí od velikosti a tvaru průřezu a potřebné přesnosti měření. [5][6]

Průtok Q potom stanovíme dle rovnice kontinuity:

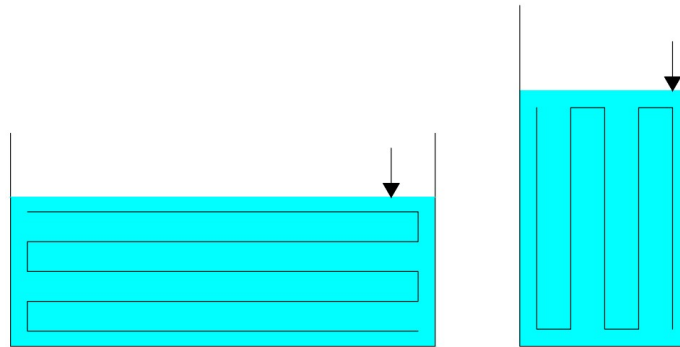
$$Q = S \cdot v, \tag{3.10}$$

kde

Q - průtok daným profilem [m^3/s],

S - plocha průtočného profilu [m^2],

v - střední profilová rychlost [m/s].



Obr. 5) Schéma posunu v horizontálním a vertikálním směru

3.3.3 Pruhová metoda

Pruhová metoda je zjednodušením integrační metody, kdy je měřidlo posouváno pouze po jedné horizontále/vertikále. Pohyb měřidla po celou dobu měření je posuvně vratný (v případě dosažení jednoho konce dráhy, se pohybuje měřidlo po stejné dráze zpět k opačnému konci). Pohybovat měřidlem může sám měřič nebo může být pohyb zprostředkovaný pomocí pojezdu, na kterém je upevněna tyč se samotným měřidlem.

Dráhu pro měření volíme z předešlých znalostí rozložení rychlosti v daném profilu tak, aby byly postiženy veškeré deformace rychlostního pole.

Vyhodnocení probíhá stejně jako u integrační metody, tedy podle rovnice 2.3.

3.3.4 Ostatní metody

3.3.4.1 Zkrácené bodové metody

Zkrácenými bodovými metodami dosahujeme menší přesnosti ve výsledcích měření. Používají se ale dodnes často, protože jsou časově méně náročné. Jejich princip vychází z rozložení rychlosti na svislici. [2][7]

Průměrnou rychlost na svislici v_p stanovíme podle následujících vztahů. Dolní indexy značí procentuální hloubku ode dna, u_d značí bodovou rychlost u dna, u_h značí bodovou rychlost u hladiny.

Jednobodová metoda

Měříme rychlost proudění pouze v jednom bodě na dané svislici. Vodoměrná vrtule je umístěna v 0,4 násobku celkové výšky svislice, vzdálenost měříme od dna. Změřená hodnota je považována za průměrnou hodnotu rychlosti na svislici. [2][7]

$$v_p = u_{0,4} \quad (3.11)$$

Dvoubodová metoda

Průměrnou rychlost na svislici získáme jako průměr ze dvou měření. Jedno měření probíhá ve vzdálenosti 0,2 násobku výšky svislice, druhé v 0,8 násobku výšky svislice. Obě vzdálenosti měříme od dna. [2][7]

$$v_p = \frac{1}{2}(u_{0,2} + u_{0,8}) \quad (3.12)$$

Tříbodová metoda

U tříbodové metody se rychlost na svislici měří třikrát- ve vzdálenosti 0,2 násobku výšky svislice, v 0,4 násobku výšky svislice a v 0,8 násobku svislice. Všechny vzdálenosti měříme ode dna. Výslednou průměrnou rychlost na svislici získáme jako průměr z naměřených hodnot nebo podle rovnice [2][7]:

$$v_p = \frac{1}{4}(u_{0,2} + 2u_{0,4} + u_{0,8}) \quad (3.13)$$

Pětibodová metoda

Pětibodová metoda vychází ze tří rychlostí změřených v tříbodové metodě. Navíc se přidají dvě měření- co neblíže dnu a co neblíže hladině. Průměrná rychlost na svislici se pak určí graficky nebo pomocí rovnice [2][7]:

$$v_p = \frac{1}{10}(u_d + 2u_{0,2} + 3u_{0,4} + 3u_{0,8} + u_h) \quad (3.14)$$

Šestibodová metoda

Rychlosti se měří v 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 násobku výšky svislice a co neblíže dnu a hladině. Přenesením naměřených rychlostí do grafu lze pomocí planimetru získat průměrnou rychlost nebo měrný průtok. Ke stanovení průměrné svislicové rychlosti lze využít rovnici [2][7]:

$$v_p = \frac{1}{10}(u_d + u_{0,2} + 2u_{0,4} + 2u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_h) \quad (3.15)$$

Hladinová jednobodová metoda

Používá se jen v případech, kdy není možné využít žádnou z výše zmíněných metod. Měří se pouze v jednom bodě těsně pod hladinou. Je nutné dbát na to, aby měření nebylo ovlivněno větrem a vlnami, dále také musí měření probíhat ve stejné výšce od hladiny ve všech svislicích. Průměrnou rychlost na svislici získáme vynásobením předem odvozeným koeficientem pro daný profil a průtok. [2][7]

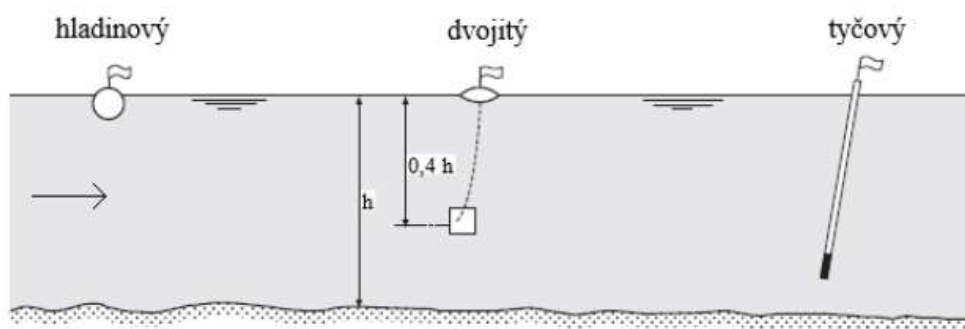
3.3.5 Měřidla pro měření rychlosti proudění

V této kapitole jsou podrobněji popsána měřidla, která se používají pro stanovení rychlosti proudění v daném profilu. Jedná se jak o měřidla klasická- plováky, vodoměrné vrtule, tak o měřidla moderní- EMI měřidla, ultrazvuková měřidla.

3.3.5.1 Plováka

Plováková měřidla se považují za nejstarší a nejjednodušší metodu měření rychlosti proudění. Princip měření vychází z toho, že plovák se pohybuje stejnou rychlostí jako kapalina v jeho okolí. Používají se různé typy plováků:

- hladinové- používají se především při povodních. Část plováku nad hladinou nesmí být ovlivněna větrem.
- dvojitě- jsou spojením hladinového a hlubinného plováku. Využívají se k měření v hlubokých řekách k přímému měření rychlostí v určité hloubce od hladiny.
- tyčové- jsou tvořeny latí, která je na konci zatěžkána. [3][7]

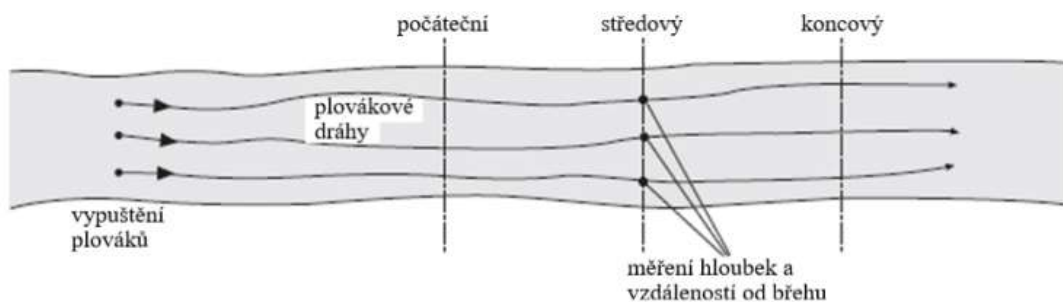


Obr. 6) Typy plováků [3]

V měřeném úseku vymežíme tři příčné profily- na začátku, uprostřed a na konci. Délka měření se doporučuje minimálně 20 sekund. Nejdříve se měří doba od počátečního profilu k prostřednímu, pak od prostředního ke koncovému, kdy prostřední profil slouží především jako kontrola správného měření mezi počátkem a koncem. [7]

V počátečním profilu musí mít plovák konstantní rychlost, musí se tedy vypustit ještě před profilem, aby došlo k ustálení. Pro větší přesnost měření se doporučuje provést několik měření v různých vzdálenostech od břehu a s různými typy plováků. [7]

Dnes plováky používáme jen ve výjimečných případech. Jedná se zejména o situace, kdy rychlosti proudění vody v průřezovém profilu dosahují takových rychlostí, že není možné použít vodoměrné vrtule, nebo když jsou v průřezovém profilu extrémní hloubky. Dalším případem může být materiál, který je přítomný v suspenzi, která nedovoluje použití ultrazvukového měřidla. [7]



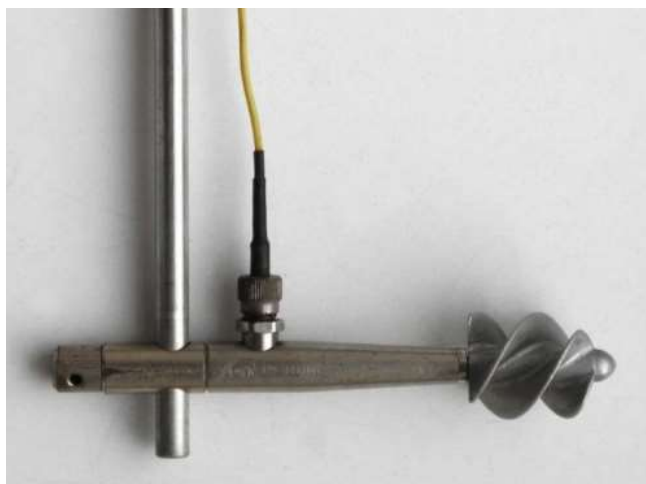
Obr. 7) Schéma měření rychlosti proudění pomocí plovákové metody s uvedením počátečního, středového a koncového profilu (jedná se o půdorysný pohled) [3]

Výslednou rychlost stanovíme podělením vzdálenosti, kterou plovák urazil, časem potřebným k překonání této vzdálenosti. Pro získání průměrné rychlosti je nutné vynásobit průměr z několika měření vhodným součinitelem. [7]

3.3.5.2 Vodoměrná vrtule

Vodoměrné vrtule patří ke klasickým měřidlům pro měření rychlosti proudění. Měří se jimi bodová rychlost, lze je ale použít i k plošné integrační metodě. Vrtule podle osy dělíme na dva typy- s horizontální osou (tzv. propelerového typu), které se využívají zejména v Evropě, a s vertikální osou (tzv. miskovitého typu), které svoje uplatnění našly v USA. [3]

Soustava, na které je samotná vrtule upevněna, se skládá ze soutyčí a signálního zařízení, které je pomocí kabelů propojeno s přístrojem pro měření otáček. Jednotlivé propelery se od sebe liší poloměrem a stoupáním- s rostoucí rychlostí proudění, roste stoupání propeleru. Vrtule je možné používat pouze v rozsahu kalibrace. [3][7]



Obr. 8) Vodoměrná vrtule propelerového typu 5 upevněná na soutyči [5][6]

Pro výběr vhodného propeleru pro dané měření platí několik zásad:

1. Rychlost proudění- pokud je rychlost proudění menší než 1,2 m/s, použijeme pro měření propeler typu 5 nebo 6, pokud rychlosti dosahují vyšších hodnot, využijí se propelery 3 a 4 z tabulky 3.
2. Šířka profilu- pokud je menší než 0,5 m, použijí se propelery 5 a 6. Tyto propelery jsou vhodné pro měření co nejbližší k hladině a omočenému obvodu.

Tabulka 3- Přehled propelerů a podmínky jejich použití [2]

Označení propeleru	Průměr D [mm]	Stoupání S [mm]	Minimální doporučená rychlost [m/s]	Maximální rychlost [m/s]
1	50	50	0.050	1.2
2	50	100	0.100	2.2
3	50	250	0.200	4.0
4	50	500	0.250	5.0
5	30	50	0.050	1.2
6	30	100	0.100	2.2

Při měření bodovou metodou za použití vodoměrných vrtulí platí následující. Délka měření musí být minimálně 30 s, tuto dobu je možné zkrátit na 15 sekund, v takovém případě je nutné zvýšit počet bodů měření v měrném profilu. [2]

Při měření plošnou integrační metodou platí, že pohyb vodoměrnou vrtulí po předem daných horizontálách (vertikálách) nesmí být větší než 2 m/min. Minimální doba měření je 60 sekund. V případech, kde je rychlost posunu měřidlem větší než 0,5 m/min, je možné dobu měření zkrátit na 30 sekund. Celé měření je nutné alespoň třikrát zopakovat. [2]

Rychlost z počtu otáček, které byly naměřeny, se stanoví pomocí rovnice:

$$v = \alpha + \beta n, \quad (3.17)$$

kde

v - bodová rychlost [m/s],

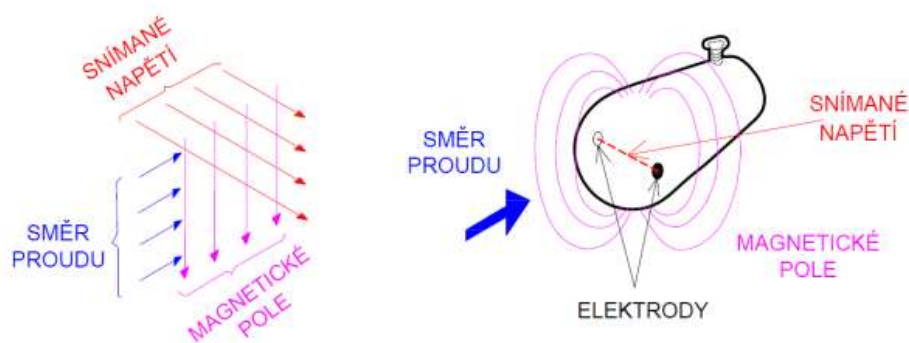
n - počet otáček,

α, β - kalibrační konstanty vodoměrné vrtule. [5][6]

3.3.5.3 Elektromagnetická indukční měřidla (EMI)

Stejně jako vodoměrné vrtule, lze použít EMI měřidla pro stanovení bodových rychlostí, zároveň je lze použít i pro plošnou integrační metodu. Jejich velkou výhodou je, že se neskládají z žádných pohyblivých částí. Tím dochází k eliminaci tření a odporů. Jsou vhodné i pro měření v malých hloubkách s podmínkou, že hloubka je větší než trojnásobek rozměru sondy. Zároveň jsou schopny měřit větší rozsah rychlostí proudění než vodoměrné vrtule za použití pouze jedné sondy, propelery vodoměrných vrtulí jsou schopny měřit rychlosti proudění pouze v určitém rozsahu. [5][6]

Principem měření rychlosti proudění je Faradayův zákon o elektromagnetické indukci. V případě EMI měřidel je napětí indukováno na konci sondy. Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná velikosti proudění (s rostoucí rychlostí roste indukované napětí). Snímač sestává z elektrické cívky, která kolem sebe vytváří magnetické pole. Na konci snímače jsou umístěny dvě uhlíkové elektrody, kterými je měřeno napětí indukované proudící kapalinou. Napětí je následně převedeno na rychlost. [5][6][7]



Obr. 9) Princip měření rychlosti kapaliny snímačem EMI měřidla a uspořádání hlavice snímače [5][6]

Souprava pro měření se skládá ze snímače, datového kabelu a vyhodnocovací jednotky. Snímač je připevněn na nosnou tyč, která nám umožňuje umístit měřidlo do libovolného bodu v měrném profilu. Snímač je propojen datovým kabelem s vyhodnocovací jednotkou, která měří současně i elektrické napětí soustavy. Celá souprava pro měření musí být kalibrována současně. Nelze použít prvky z několika měřících souprav. [5][6]

Při využití EMI měřidel u bodové metody platí následující. Minimální doba měření je stanovena na 30 sekund, přičemž je možné dobu zkrátit na 10 sekund. Pokud měření opakujeme dvakrát těsně za sebou, je možné dobu měření zkrátit na 5 sekund. V takovýchto případech je potřeba přidat více bodů měření do měrného profilu. [2]

Měřidlo MF PRO doplnit info o kalibraci před započítím měření

Jedná se o měřidlo od firmy OTT Hydrometr a je jedním z nejnovějších zařízení na trhu, které je určeno k měření průtoku v systémech s volnou hladinou. Měřicí systém se skládá z:

- senzoru s třemi uhlíkovými elektrodami, uhlíkové elektrody se nacházejí v přední zakulacené části,
- mikroprocesoru, který zpracuje zachycený signál,
- kabelu, který přenesení signál z mikroprocesoru do vyhodnocovací jednotky,
- vyhodnocovací jednotky, která vyhodnotí daný signál a výsledek zobrazí na digitálním displeji.

Senzor s kabelem a vyhodnocovací jednotkou je zobrazen na obr. 10. Přenosný systém lze využít k měření v terénu i v laboratorních podmínkách. Umožňuje měřit turbulentní proudění, rychlé i pomalé proudění. Pokud je senzor umístěn do proudící vody, vytvoří se magnetické pole, které senzor zaznamená. Signál se zpracuje a následně přenesení kabelem do přenosného měřícího přístroje. Na displeji tohoto přístroje se zobrazí výsledná hodnota. [10]

Přístroj umožňuje měřit v několika režimech. Prvním z nich je měření v reálném čase. Tento režim umožňuje získat informace o rychlosti a hloubce přímo v čase měření. Je také možné přepínat mezi zobrazením grafickým, kde je zobrazen průběh rychlosti v čase, a digitálním, kde se zobrazuje okamžitá rychlost proudění. Podle nastaveného režimu se na digitální obrazovce aktualizuje hodnota průměrné rychlosti. Hodnota se aktualizuje

buď po pevně nastaveném časovém úseku- režim FPA, nebo se aktualizuje každých 250 ms- režim rC. [10]

Dalším režimem je profiler, který se využívá zejména pro měření ve vodních tocích a průtočných vedeních a slouží pro bodové měření v daném průtočném profilu. Výsledky se postupně ukládají do paměti, přičemž je možné během jednoho měření uložit až 10 profilů po 32 svislicích. [10]

Před započítím každého měření je nutné měřidlo zkalibrovat při nulové rychlosti. [10]



Obr. 10) Měřicí sestava s měřidlem MF pro od firmy OTT hydrometr [6]

Měřidlo Flo-Mate 2000

Jedná se o měřidlo od firmy MARSH McBIRNEY, model *Flo-Mate 2000*. Měřidlo je přenosný přístroj fungující na principu elektromagnetické indukce kapalin, který lze použít pro měření rychlosti proudění v terénu i v laboratoři. Rychlost je možno zobrazit ve dvou jednotkách- stopy za sekundu nebo metry za sekundu. Kryt přístroje je z vodotěsného materiálu, aby při jeho namočení nedošlo k poškození elektroniky. Zdrojem pro fungování přístroje jsou dvě baterie. Vyhodnocovací jednotka a sonda měřidla *Flo-Mate 2000* jsou zobrazeny na obrázku 11. [11]

Snímač je složen z elektromagnetické cívky, která vytváří magnetické pole. V přední zakulacené části sondy se nacházejí tři uhlíkové elektrody. Výsledné napětí je zpracováno elektronikou a jako výsledek se na digitálním displeji zobrazí rychlost ve zvolených jednotkách. [11]

Na tomto zařízení jde pracovat ve dvou módech- v reálném čase nebo vyvoláním z paměti. Mód reálného času umožňuje měřit ve dvou režimech- FPA a rC. [11]

Pokud měříme v režimu FPA, na displeji bude vždy po určité periodě aktualizována průměrná rychlost, přístroj bude kontinuálně ale měřit dál. Časovou periodu můžeme zvolit v rozmezí 2 až 120 sekund. Na spodní hraně displeje je také možné odečítat zbývající délku měření díky časové liště. Režim rC slouží k filtraci okolních vlivů. Zprvu přístroj měří rychlosti v plném rozsahu, i tyto rychlosti jsou přesné, mohou se ale od sebe mírně lišit. Ve chvíli, kdy dojde k vyrovnání výsledků, měřidlo dokázalo úspěšně vyfiltrovat vnější vlivy. Pro co nejpřesnější vyfiltrování okolních vlivů je nutné měření zopakovat alespoň pětkrát. V tomto módu na spodní hraně displeje není časová lišta, protože displej je kontinuálně aktualizován. [11]

Pro ukládání měření do paměti je určeno 19 míst, ze kterých lze následně výsledky vyvolat. Zapnutí módu vyvolávání z paměti rozpoznáme díky blikajícímu poli s číslem umístění v paměti. [11]

Dále je nutné provést kontrolní měření nulové rychlosti. Měřidlo se umístí do nádoby o objemu 20 litrů, která se naplní vodou. Je nutné zajistit, aby se voda vůbec nepohybovala, proto je vhodné s měřením počkat alespoň deset až patnáct sekund po umístění měřidla do vody. [11]



Obr. 11) Měřicí sestava s měřidlem Flo-mate 2000 od firmy MARSH McBirney [6]

FARADAYŮV ZÁKON ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE

Jak bylo popsáno výše, elektromagnetická indukční měřidla fungují na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukci. Tento zákon vyslovil Michael Faraday v roce 1831. Zákon pojednává o vzniku elektromagnetické indukce, která vzniká na základě změny magnetického indukčního toku. Napětí se začne indukovat, až ve chvíli, kdy:

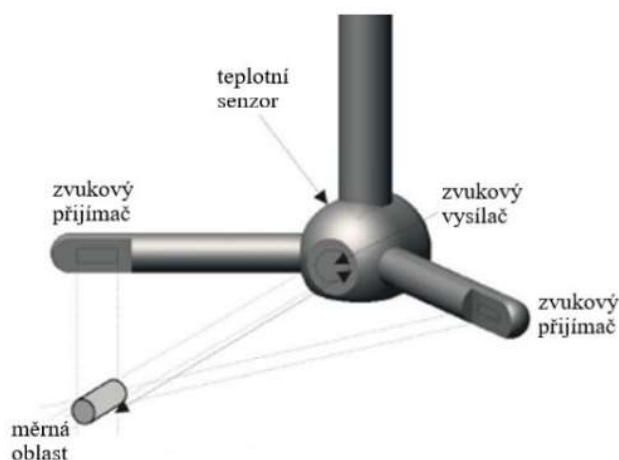
- je vodič uveden do pohybu,
- zdroje magnetického pole se začnou pohybovat,
- dochází ke změně magnetického pole (např. v důsledku změny elektrických proudů). [12]

Předchozí situace způsobí vznik elektrického proudu v uzavřeném obvodu i bez připojení zdroje. Elektrický proud vzniká v obvodu díky tomu, že na nabitě částice elektrického obvodu začnou působit síly, které částice uvedou do pohybu. Indukované napětí je přímo úměrné rychlosti proudění.[12]

3.3.5.4 Ultrazvuková měřidla

Jedná se o novou metodu. Metoda měření vychází z předpokladu, že částice unášené vodou se pohybují stejnou rychlostí jako samotná voda. Měřicí sestava se skládá z jednoho vysílače, několika přijímačů zvukového signálu, kabelu, tyče a výpočetního zařízení. Podle počtu přijímačů rozeznáváme dva typy sond:

- 2D sonda- s dvěma přijímači, umí vyhodnotit pouze horizontální pohyb částic,
- 3D sonda- se třemi přijímači, které umí vyhodnotit jak horizontální tak vertikální pohyb částic. [3]



Obr. 12) Příklad ultrazvukové 2D sondy [3]

Základním principem ultrazvukových měřidel je Dopplerův jev. Ten je popsán jako změna frekvence zvuku, který je vyslán a následně zachycen. Děje se tak kvůli vzájemnému pohybu zdroje a přijímače. [3]

Měření probíhá stejně jako u měření vodoměrnou vrtulí, jak bylo popsáno v kapitole 3.3.

Mezi výhody měření pomocí ultrazvuku patří jednoduchá údržba. Další výhodou je, že měřidlo neobsahuje žádné pohyblivé části, čímž odpadají nepřesnosti třením stejně jako u EMI měřidel. Oproti předešlým typům měřidel umí ultrazvuková měřidla samy upozorňovat na nepřesnosti během samotného měření, díky čemuž jsme schopni dosáhnout přesnějších výsledků. [3]

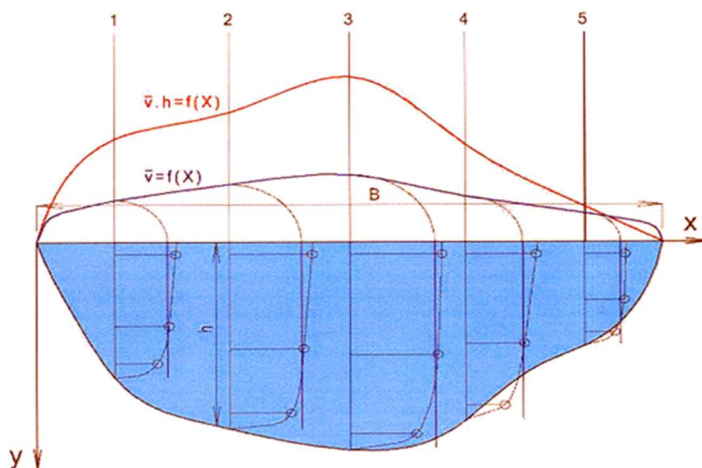
4 VYHODNOCENÍ PRŮTOKU

Níže popsané metody se využívají ke stanovení průtoku měrným profilem. V případech, kdy je nutné dopočítat rychlost proudění, se podělí výsledný průtok plochou měrného profilu.

4.1 GRAFICKÁ METODA

4.1.1 Integrace hloubka- rychlost (metoda rozdělení rychlostí)

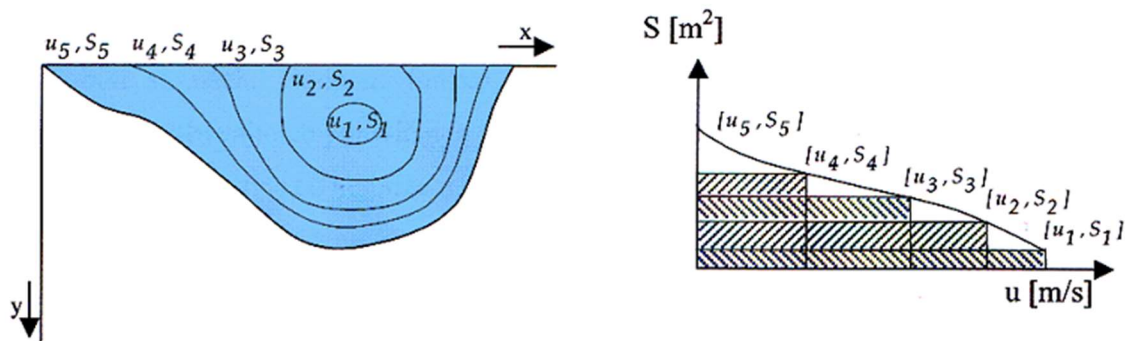
K nejpoužívanější grafické metodě patří integrace hloubka- rychlost. U této metody se vychází z naměřených hodnot rychlostí na měrné svislici. Ty se nanosou na danou svislici proti hloubce. Následně se jednotlivé body spojí do křivky. Plocha, která vznikne mezi danou křivkou, čarou hladiny a šířkou vymezenou měrným pásem, udává průtočné množství v daném pásu. Hodnoty průtoků se vynesou obdobně jako naměřené rychlosti a znovu se spojí do křivky. Nově vzniklá plocha mezi křivkou od průtoků v daném pásu a čarou hladiny udává průtočné množství v celém profilu. [7][8] [9]



Obr. 13) Princip integrace hloubka- rychlost [7]

4.1.2 Integrační metoda rychlostního pole (metoda rychlostního profilu)

Tato metoda vychází z vykreslení izotach (čar spojujících místa se stejnou bodovou rychlostí). Plochy vymezené sousedními izotachami jsou změřeny planimetrem. Hodnota rychlosti a změřené odpovídající ploše se vynesou do grafu. Pomocí integrace nebo numerické integrace křivky vzniklé vnesením rychlostí a ploch se nalezne celkové průtočné množství v měrném profilu. [7][8] [9]



Obr. 14) Princip metody integrace rychlostního pole [7]

4.2 ARITMETICKÉ METODY

Aritmetické metody obecně vycházejí z aproximace funkce a následné integraci přes šířku měrného profilu B :

$$Q = \int_0^B f(x) dx, \quad (4.1)$$

kde

B - šířka měrného profilu měřená v hladině [m],

Q - celkový průtok [m^3/s].

V praxi jsou často využívány pro svoji rychlost výpočtu, díky čemuž je výpočet možno provádět ručně bez pomoci softwarů. Je ale možné je použít i ve výpočtech v softwarových aplikacích, kde dochází k aproximaci $f(x) = \bar{v} \cdot h$ vhodnou funkcí. [7][8] [9]

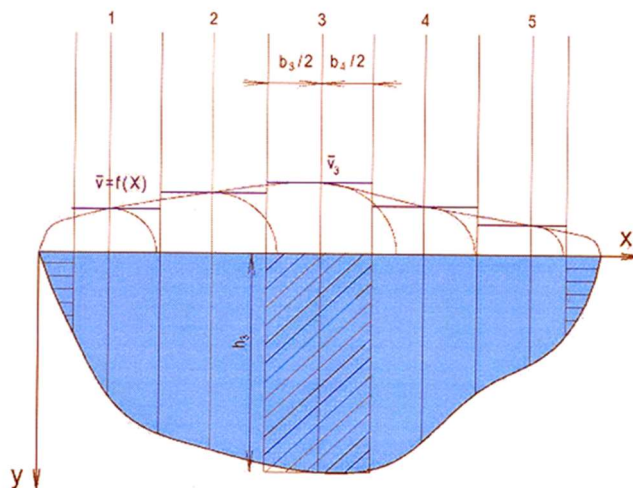
4.2.1 Metoda svislicových pásů

Metoda svislicových pásů vychází z předpokladu, že funkce $f(x) = \bar{v} \cdot h$ se po šířce měrného profilu mění lineárně. Celkový průtok se nalezne tak, že průměrné rychlosti dané svislice se vynásobí hloubkou a šířkou pásu. Šířka pásu je rovna součtu polovin vzdáleností k sousedním svislicím. Výpočet probíhá pro každou svislici zvlášť podle vzorce:

$$Q = \sum_{i=1}^m \bar{v}_i h_i \frac{b_{i-1,i} + b_{i,i+1}}{2}, \quad (4.2)$$

kde

m - počet svislic. [7][8] [9]



Obr. 15) Princip metody svislicových pásů [7]

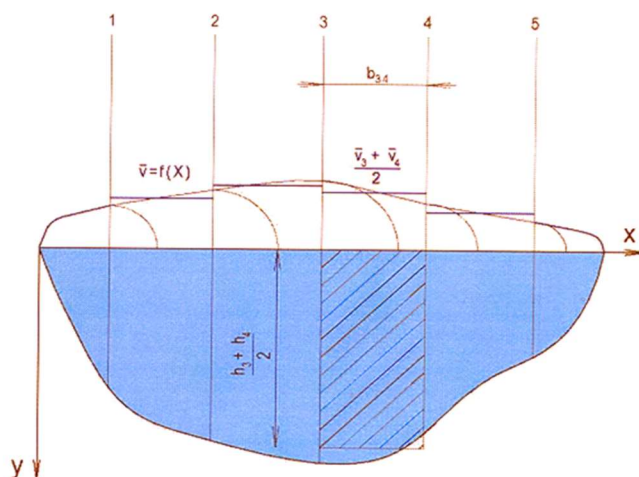
4.2.2 Metoda mezisvislicových pásů

Průtočný profil je rozdělen na několik pásů. Každý pás je vymezen dvěma přilehlými svislicemi. Průtok v daném pásu se zjistí tak, že se určí součin šířky pásu, hloubky pásu a aritmetického průměru z průměrných rychlostí na přilehlých svislicích. Sečtením průtoků ve všech pásích daného průtočného profilu zjistíme výsledný celkový průtok průtočným profilem:

$$Q = \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) \cdot b_{i,i+1} , \quad (4.3)$$

kde

m - počet svislic. [7][8][9]



Obr. 16) Princip metody mezisvislicových pásů [7]

4.3 OSTATNÍ METODY

4.3.1 Metoda nezávislé svislice

Metoda nezávislé svislice se využívá v případech, kdy se průtok mění rychle v čase. Tato metoda vychází z výše popsaných metod, rozdílem je, že se pro každý pás sleduje změna hloubky a také je pro každý pás tvořena vlastní měrná křivka. [7][8][9]

4.3.2 Metoda horizontálních rovin

Jedná se o analogii k metodě mezisvislicových pásů, ale místo rychlostí na svislici se uvažuje rychlost proudění na horizontále. Tato metoda je vhodná k ověření správnosti výsledků z jiných metod vyhodnocení. [7][8][9]

5 NEJISTOTY MĚŘENÍ PODLE ČSN ISO 748

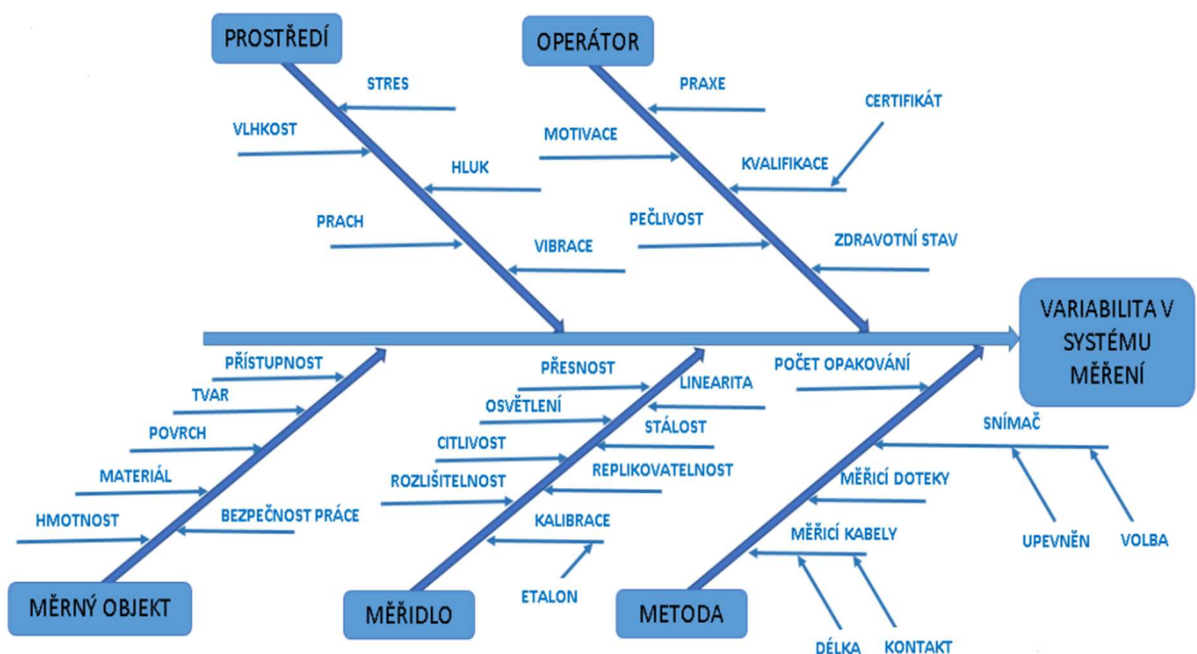
Slovem nejistota je v tomto případě myšlen parametr přidružený k výsledku měření charakterizující rozptyl hodnot, které se vztahují k dané veličině. Nejistoty měření se stanovují na základě statistického zpracování naměřených dat. Výsledkem je interval, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází reálná hodnota veličiny. Charakterizovat nejistotu lze podle veličiny u - standardní nejistota. Tu lze vyjádřit dvěma způsoby:

- jako absolutní standardní nejistotu vyjádřenou ve stejných jednotkách jako je měřená veličina,
- jako relativní standardní nejistotu vyjádřenou jako poměr mezi naměřenou hodnotou a stanovenou hodnotou měřené veličiny. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která se ve většině případů vyjadřuje v procentech. [5][6][13]

Standardní nejistoty podle způsobu vyhodnocení dělíme na:

- standardní nejistotu stanovenou způsobem A,
- standardní nejistotu stanovenou způsobem B. [5][6][13]

Při volbě způsobu vyhodnocení záleží, zda máme k dispozici hodnoty opakovaných měření. Pokud ano, vyhodnocujeme nejistotu způsobem A. Pokud tyto hodnoty nemáme k dispozici, vyhodnocujeme způsobem B. [5][6][13]



Obr. 17) Diagram příčin a následků pro variabilitu v systému měření [5][6]

5.1 STANDARDNÍ NEJISTOTA URČENÁ ZPŮSOBEM A

Jak již bylo uvedeno výše, při určení nejistoty způsobem A jsou statisticky zpracovány naměřené hodnoty. Jednotlivá měření by měla být zopakována nejméně 10krát za stejných podmínek, ale nezávisle na sobě. Obdržžený výsledek je ve stejných jednotkách jako měřená veličina. Obecně nejistoty určené způsobem A označujeme u_a . [5][6][13]

Pro výpočet standardní nejistoty měření je nejdříve potřeba určit výběrový průměr jednotlivých měření. Ten lze určit podle vztahu:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.1)$$

kde

n - počet opakování měření parametru X ,

i - i -tá hodnota měřeného parametru X . [5][6][13]

Dále je stanovena směrodatná odchylka výběrového průměru x , která je charakteristikou rozptýlení hodnot výběrových průměrů. Směrodatná odchylka výběrového průměru udává velikost nejistoty udávané hodnoty měřeného parametru X a lze ji určit pomocí rovnice:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5.2)$$

V případě, že známe funkci Y , která je funkcí nezávislých parametrů X_1, X_2, \dots, X_m a lze ji zapsat jako $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m)$, určíme nejistotu typu A dle Gaussova zákona šíření chyb:

$$u_{AY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} s_{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} s_{\bar{x}_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} s_{\bar{x}_m}\right)^2}, \quad (5.3)$$

kde

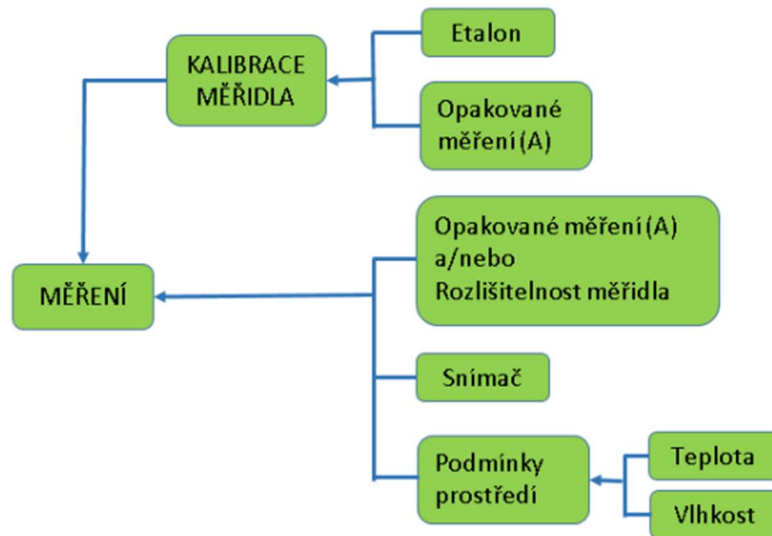
s_{x_i} - směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X_j ,

$\frac{\partial y}{\partial x_j}$ - parciální derivace funkce Y podle parametru X_j . [5][6][13]

5.2 STANDARDNÍ NEJISTOTA URČENÁ ZPŮSOBEM B

Jako standardní nejistotu určenou typem B, souhrnně označovanou jako u_B , jsou chápány chyby, jejichž vliv nelze snížit opakováním měření. Jedná se o chyby, které jsou přejímány z technické dokumentace- certifikáty, kalibrační listy, technické normy, typová

osvědčení měřidel, údaje výrobců použitých měřidel, technické tabulky, tabulky fyzikálních konstant, atd. [5][6][13]



Obr. 18) Schéma zdrojů nejistot měření pro způsob určení B [13]

5.2.1 Rozdělení zdrojů nejistot typu B

V případě stanovování nejistoty způsobem B je nutná zajistit, aby zdroje nejistot nevstupovaly do výpočtu vícekrát. Není znám vhodný počet zdrojů nejistot typu B, ale pokud platí následující nerovnost (5.4), považujeme zdroj za nevýznamný.

$$u_{Bi} < \frac{u_{BMAX}}{6} \quad (5.4)$$

Z nerovnosti (5.4) vyplývá, že pokud standardní nejistota typu B je menší než šestina největšího zdroje u_{BMAX} , můžeme tento zdroj zanedbat. [5][6][13]

Zdroje typu B lze rozdělit:

- variabilní systematické chyby,
- náhodné zdroje se známou variabilitou,
- ostatní známé zdroje. [5][6][13]

5.2.2 Postup určení standardní nejistoty stanovené způsobem B

Pro určení nejistoty stanovené způsobem B je třeba provést několik dílčích kroků. Zaprvé musíme odhadnout změnu rozpětí odchylek $\pm z_{max}$ od výsledné veličiny parametru X tak, aby byla zajištěna malá pravděpodobnost překročení těchto hodnot. [5][6][13]

Zadruhé je nutno určit ε . Hodnota ε se vybere na základě průběhu pravděpodobnosti odchylek v odhadnutém intervalu. Tato hodnota odvisí od hustoty pravděpodobnosti. V případech, kdy největší pravděpodobnost mají nejmenší odchylky, jedná se o Gaussovo nebo trojúhelníkové rozdělení. V takových případech je uvažováno $\varepsilon=3$, resp. 2,45. Pokud platí, že se na daném intervalu nacházejí velké a malé odchylky s přibližně stejnou pravděpodobností nebo neznáme přesné chování, jedná se o rozdělení rovnoměrné a hodnotu ε uvažujeme rovnou $\sqrt{3}$. [5][6][13]

Dále je třeba stanovit hodnotu směrodatné odchylky parametru X dle následujícího vztahu:

$$s_x = \frac{z_{Xmax}}{\varepsilon}, \quad (5.5)$$

kde

z_{max} - maximální odchylka od nominální veličiny parametru X , u které je pravděpodobnost překročení jen velmi malá,

ε - koeficient statistického rozdělení.[13]

Celý postup vychází z teorie matematické statistiky, kde platí „pravidlo 3- sigma“- pro $\varepsilon=3$ a Gaussovo normální rozdělení. Pokud se řídíme tímto postupem, máme velkou pravděpodobnost- 0,997, že výsledná hodnota základního souboru bude ležet v intervalu $\pm 3\sigma$. Pro σ platí, že je rovna směrodatné odchylce a její velikost je rovna odmocnině z rozptylu (σ^2). [5][6][13]

Stejně jako u standardní nejistoty stanovené způsobem A platí i pro standardní nejistoty stanovené způsobem B, že pokud máme funkci Y , která je funkcí nezávislých X_1, X_2, \dots, X_m , potom můžeme standardní nejistotu určenou způsobem B spočítat následovně:

$$u_{BY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} s_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} s_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} s_{x_j}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} s_{x_m}\right)^2}, \quad (5.6)$$

kde

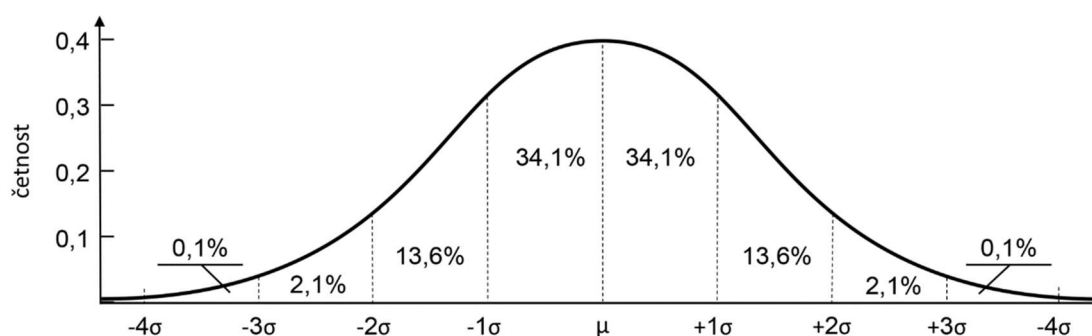
s_{xi} – směrodatná odchylka parametru X_j ,

$\frac{\partial Y}{\partial X_j}$ – parciální derivace Y podle parametru X_j . [5][6][13]

5.3 GAUSSOVO NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ

Jedná se o rozdělení náhodné veličiny. Mezi náhodné děje, ze kterých vyplývají náhodné veličiny, lze řadit i chyby měření. Normální rozdělení je definováno dvěma veličinami – střední hodnotou μ a rozptylem σ^2 . Gaussovo normální rozdělení je možné popsat Gaussovou křivkou. Ta je symetrická a popisuje hustotu pravděpodobnosti, že výsledky náhodného pokusu leží v určité oblasti. Střední hodnota μ leží přímo pod vrcholem této křivky. Z tohoto faktu vyplývá, že při opakování náhodného pokusu, budou nejčastěji vycházet hodnoty okolo střední hodnoty. Zároveň výsledky vychýlené nad a pod střední hodnotu budou při opakování náhodného pokusu vycházet se stejnou pravděpodobností. V praxi jsou používána pravidla tří, dvou nebo jednoho σ . Tyto pravidla vycházejí z předpokladu, že výsledek náhodného pokusu s normálním rozdělením leží v intervalu:

- $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ s pravděpodobností 68,27 %,
- $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ s pravděpodobností 95,45 %,
- $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ s pravděpodobností 99,73 %. [14]



Obr. 19) Křivka Gaussova normálního rozdělení [14]

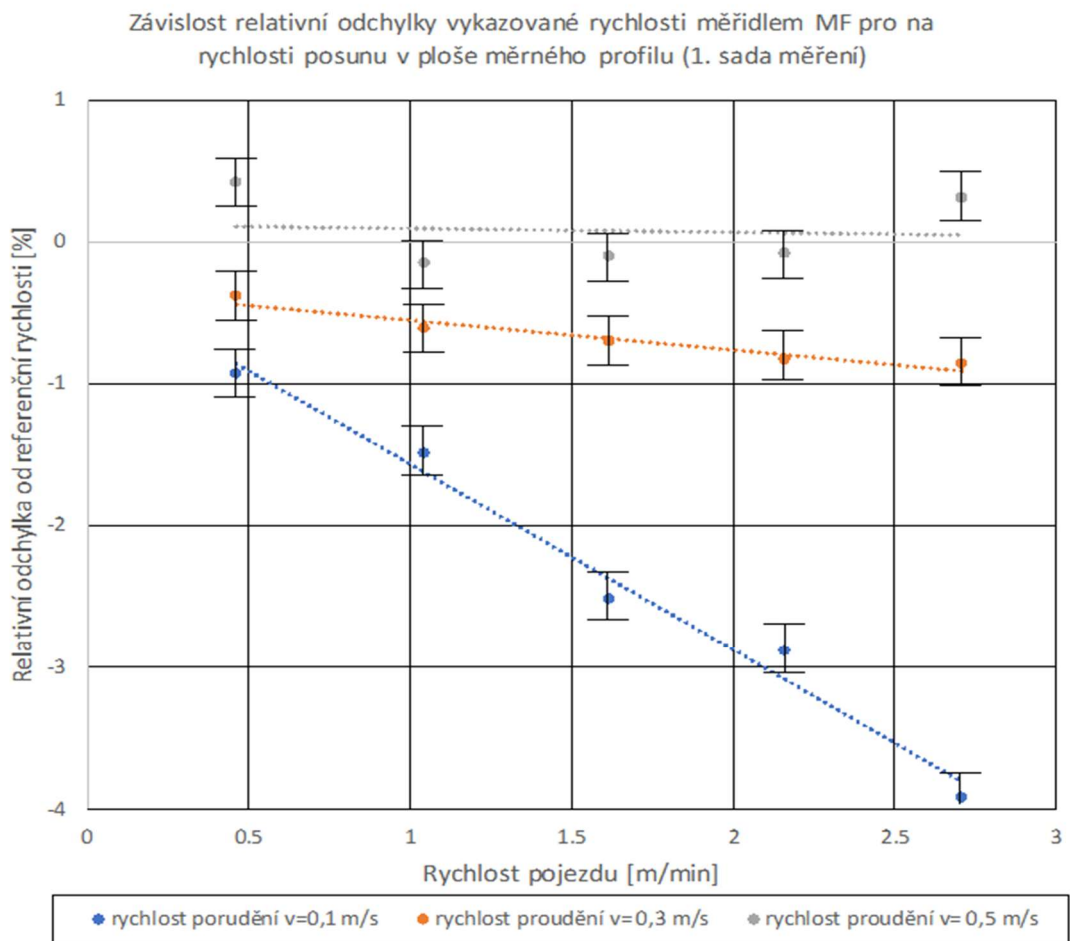
5.4 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

Směrodatná odchylka vyjadřuje, jak jsou hodnoty odchýleny od průměrné hodnoty, nebo-li jak se od sebe navzájem liší jednotlivé hodnoty zkoumaného souboru. Je definována jako odmocnina z rozptylu:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \tag{5.7}$$

Z podstaty její definice vyplývá, že může nabývat pouze kladných hodnot.

Směrodatná odchylka je vyjadřována ve stejných jednotkách jako měřená veličina. V případě měření rychlosti proudění je směrodatná odchylka vyjádřena v m/s. [17]



0br. 20) Znáznornění směrodatné odchylky pro naměřené body

6 NEJISTOTA MĚŘENÉHO PRŮTOKU PŘI UŽITÍ METODY RYCHLOSTNÍHO POLE

Vztah pro výpočet průtoku metodou rychlostního pole je popsán v kapitole 3.3. Pro výpočet nejistoty je důležitý vztah (3.9).

Kombinací dílčích nejistot získáme výslednou rozšířenou nejistotu. Mezi zdroje, které nejvíce ovlivňují výslednou hodnotu patří:

- nejistota určená způsobem A a B při měření šířky pásu,
- nejistota určená způsobem A a B při měření hloubky pásu,
- nejistota určená způsobem A ve stanovení rychlosti proudu,
- nejistota určená způsobem A a B zohledňující kalibraci měřidla rychlosti vodního proudu,
- nejistota určená způsobem A ve stanovení průměrné rychlosti na svislici,
- nejistota určená způsobem B ve stanovení průtoku (průřezové rychlosti) v měrném profilu. [6]

Díky vynásobení hodnoty standardní nejistoty stanovené způsobem A a způsobem B koeficientem $k_U=2$ hovoříme o nejistotách na hladině spolehlivosti 95%. Výsledkem je rozšířená nejistota, která vznikne sloučením relativní rozšířené nejistoty určené způsobem A a způsobem B dle vztahu:

$$p_Q = \sqrt{p_{AQ}^2 + p_{BQ}^2}, \quad (6.1)$$

kde

p_{AQ} - relativní rozšířená nejistota určená způsobem A na hladině spolehlivosti 95%,

p_{BQ} - relativní rozšířená nejistota určená způsobem B na hladině spolehlivosti 95%. [6]

6.1 URČENÍ NEJISTOTY STANOVENÉ ZPŮSOBEM A

Pro určení celkové relativní nejistoty stanovené způsobem A p_{AQ} se postupuje podle následující rovnice, která je v souladu s ČSN ISO 5168:

$$p_{AQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(b_i h_i \bar{v}_i)^2 (p_{Abi}^2 + p_{Ahi}^2 + p_{Avi}^2 + (\frac{1}{n})(p_{Aci}^2 + p_{Aui}^2))]}{(\sum_{i=1}^m b_i h_i \bar{v}_i)^2}}, \quad (6.2)$$

kde

m - počet svislic,

n - počet bodů na svislici,

p_{Ab} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky pásu na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Ah} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubek na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Au} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Ac} - relativní nejistota stanovená způsobem A zohledňující reprodukovatelnost kalibračních konstant měřidla rychlosti na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Av} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení průměrné rychlosti na svislici. [2]

6.1.1 Nejistota stanovená způsobem A- měření průřezové rychlosti (průtoku) při užití plošné integrační metody

Při využití dochází k několika změnám ve výpočtu nejistoty oproti výpočtu nejistoty při využití bodové metody a zároveň ke zjednodušením. Vychází se z výpočtu průtočného množství dle rovnice (3.9). V podstatě se jedná o výpočet nejistoty v jednom pásu, jedné svislici. Jedná se tak o jeden pohyblivý bod. Rovnice pro výpočet nejistoty stanovené způsobem A pak vypadá následovně:

$$p_{AQ} = \sqrt{p_{AB}^2 + p_{Ah}^2 + \frac{1}{N}(p_{Ac}^2 + p_{Au}^2)}, \quad (6.3)$$

kde

p_{AB} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Ah} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky pásu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Ac} - relativní nejistota stanovená způsobem A vystihující reprodukovatelnost kalibračních konstant měřidla rychlosti vodního proudu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Au} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95 %,

N - počet opakování měření v měrném profilu. [6]

6.1.2 Popis dílčích složek nejistoty

Nejistota ve stanovení šířky profilu – p_{AB}

Hodnota nejistoty ve stanovení šířky profilu se určí ze statistického zpracování opakovaného měření podle ČSN ISO 5168. Přibližné hodnoty nejistoty na hladině spolehlivosti 95 % a na základě použitého materiálu pro měrný profil lze odečíst z tabulky 4. [2]

Tabulka 4- Nejistota ve stanovení šířky na hladině spolehlivosti 95 % [2]

Šířka měrného profilu v hladině [m]	Hodnota nejistoty	
	ocel, plast	beton
0,0 až 0,5	0,5 mm až 1,0 mm	2 mm až 5 mm
>0,5	1 mm až 0,3 % z šířky	3 mm až 0,5 % z šířky

Nejistota ve stanovení hloubky pásu – p_{Ah}

Stejně jako u stanovení nejistoty šířky profilu se výsledná hodnota nejistoty stanovení hloubky pásu určí ze statistického zpracování výsledků měření dle ČSN ISO 5168. Přibližné hodnoty nejistoty ve stanovení hloubky pásu lze odečíst z tabulky 5. [2]

Tabulka 5- Nejistota při měření hloubky pásu na hladině spolehlivosti 95 % [2]

Hloubka pásu [m]	Hodnota nejistoty
<0,1	0,5 mm až 1,0 mm
0,1 až 0,2	1,0 mm až 1,5 mm
>0,2	1,0 mm až 1,0% z hloubky pásu

Nejistota ve stanovení bodové rychlosti – p_{Au}

V principu se jedná o nejistotu ve stanovení rychlosti v jednom pohyblivém bodě. Správně by ale nejistota stanovení bodové rychlosti měla být značena jiným indexem než nejistota stanovení rychlosti při užití plošné integrační metody. [6]

Velikost nejistoty odvisí zejména od:

- typu měřidla,
- absolutní hodnotě měřené rychlosti,
- intenzitě turbulence proudu,
- době měření. [2]

Pro výpočet nejistoty ve stanovení bodové rychlosti jsou v MP 010 tabulky, ze kterých se hodnota přejímá. Jedná se o tabulky 6 až 9, jsou vytvořeny pro určité typy propelerů a obecně pro EMI měřidla. Pokud naše výchozí hodnoty nejsou v tabulce přímo uvedeny, určí se přesná hodnota interpolací. Hodnoty byly získány za běžných poměrů očekávatelných v profilech s volnou hladinou.

Tabulka 6- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 10 sekund; platí i pro bezprostředně po sobě provedená měření s dobou měření 5 sekund [2]

Rychlost [m]	0,1	0,3	0,5	>0,8
EMI měřidlo	22,0	12,0	9,3	7,0

Tabulka 7- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 15 sekund [2]

Rychlost [m/s]	0,1	0,3	0,5	>0,8
Propeler č.1	14,0	10,	9,1	5,2
Propeler č.3	23,0	14,0	9,6	7,5
Propeler č.5	17,0	10,0	8,2	6,3
Propeler č. 6	20,0	10,0	9,2	6,5
EMI měřidlo	19,0	10,0	9,1	5,2

Tabulka 8- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 30 sekund [2]

Rychlost [m/s]	0,1	0,3	0,5	>0,8
Propeler č.1	10,0	6,8	5,7	4,5
Propeler č.3	16,0	10,0	6,5	5,0
Propeler č.5	13,0	6,6	5,8	4,0
Propeler č. 6	14,0	7,1	5,8	4,0
EMI měřidlo	15,0	6,8	5,7	4,5

Tabulka 9- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 60 sekund [2]

Rychlost [m/s]	0,1	0,3	0,5	>0,8
Propeler č.1	7,8	5,1	3,9	3,0
Propeler č.3	12,0	6,8	4,4	3,2
Propeler č.5	8,9	4,4	4,1	2,7
Propeler č. 6	10,0	4,7	3,9	2,6
EMI měřidlo	11,0	5,1	3,9	3,0

Nejistota reprodukovatelnosti kalibračních konstant měřícího zařízení- p_{Ac}

Relativní hodnota nejistoty na hladině spolehlivosti 95 % se přebírá z ČSN EN ISO 748.

Tabulka 10- Relativní nejistota reprodukovatelnosti kalibračních konstant měřidla bodové rychlosti v % na hladině spolehlivosti 95 % [9]

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

Nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici- p_{Av}

Nejistota ve stanovení průměrné rychlosti je závislá především na:

- počtu a rozmístění bodů měření na svislici,
- absolutní hodnotě měřené rychlosti,
- metodě vyhodnocení.

Vždy se rozdělení bodů na svislici uvažováno dle ČSN EN ISO 748. Hodnota nejistoty vychází z následujících tabulek. [2]

Tabulka 11- Relativní nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici v % na hladině spolehlivosti 95 % při vyhodnocení grafickou metodou [2]

Rychlost [m/s]	Počet bodů na svislici			
	6	5	3	2
0,15	1,8	2,2	2,4	2,8
0,30	1,4	1,7	2,0	2,1
0,50	1,3	1,6	1,7	1,8
>0,50	1,2	1,5	1,6	1,7

Tabulka 12- Relativní nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici v % na hladině spolehlivosti 95 % při vyhodnocení dle rovnic v kapitole 2.3.4. [2]

Rychlost [m/s]	Počet bodů na svislici			
	6	5	3	2
0,15	2,2	2,3	2,7	2,8
0,30	1,7	1,8	2,4	2,2
0,50	1,5	1,6	2,3	1,9
>0,50	1,4	1,5	2,2	1,8

6.2 URČENÍ NEJISTOTY STANOVENÉ ZPŮSOBEM B

Pro určení celkové relativní nejistoty stanovené způsobem B p_{BQ} se postupuje podle následující rovnice, která je v souladu s ČSN ISO 5168:

$$p_{BQ} = \sqrt{p_{BB}^2 + p_{Bh}^2 + p_{Bc}^2 + p_{Bm}^2}, \quad (6.4)$$

kde

p_{BB} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Bh} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky proudu na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Bc} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibračních konstant měřidla rychlosti na hladině spolehlivosti 95%,

p_{Bm} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení průřezové rychlosti v měrném profilu v závislosti na počtu svislic m na hladině spolehlivosti 95%. [2]

6.2.1 Nejistota stanovená způsobem B- měření průřezové rychlosti (průtoku) při užití plošné integrační metody

Nejistotu stanovenou způsobem B lze určit podle následujícího vztahu:

$$p_{BQ} = \sqrt{p_{BB}^2 + p_{Bh}^2 + p_{Bc}^2 + p_{Bk}^2 + p_{Bp}^2}, \quad (6.5)$$

kde

p_{BB} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Bh} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky proudu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Bc} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační přímky (závislosti) měřidla rychlosti vodního proudu na hladině spolehlivosti 95 %,

p_{Bk} - relativní nejistota stanovená způsobem B pocházející ze způsobu stanovení opravného koeficientu integrační metody,

p_{Bp} - relativní nejistota stanovená způsobem B pocházející ze způsobu posunu. [2]

6.2.2 Popis dílčích složek nejistoty

Nejistota ve stanovení šířky- p_{BB}

Pro nejistotu ve stanovení šířky pásu je rozhodující především rozlišitelnost indikace použitého měřidla pro měření délek. Také je důležité určit vliv ostatních nedefinovaných zdrojů. Nejistotu určíme podle ČSN ISO 5168.

Nejistota rozlišitelnosti, z kalibrace měřidla šířek a ostatních zdrojů má rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. [2]

Nejistota ve stanovení hloubky - p_{Bh}

Stejně jako u nejistoty ve stanovení šířky se při vyhodnocení nejistoty ve stanovení hloubky přihlíží především k rozlišitelnosti indikace použitého měřidla pro měření hloubek, nejistotě jeho kalibrace a ostatním nedefinovaným zdrojům. Nejistota se taktéž určí podle ČSN ISO 5168.

Všechny dílčí nejistoty mají rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. [2]

Nejistota ve stanovení kalibračních konstant- p_{Bc}

Hodnota relativní nejistoty na hladině spolehlivosti se přebírá z kalibračního listu daného měřidla. [2]

Nejistota ve stanovení opravného koeficientu- p_{Bk}

Opravný koeficient k se zjistí na základě analýzy hodnot, které byly získány laboratorním výzkumem. Pomocí metody nejmenších čtverců jsou určeny dílčí nejistoty, jejichž hodnota ukazuje do jaké míry se regresní funkce shoduje s naměřenými hodnotami. Výsledkem je opravný koeficient k na hladině spolehlivosti 95 %.

Nejistota ve stanovení opravného koeficientu při užití integrační metody- p_{Bk}

V případě použití EMI měřidel je brána hodnota rovna 2,6 %, v případě použití vodoměrných vrtulí je brána hodnota rovna 3,2 %. Pokud je pro pohyb měřidlem použit traverzační posun, je hodnota nejistoty menší.[6]

Nejistota plynoucí ze způsobu posunu- p_{Bp}

Její určení je z technického hlediska náročné, určení je i časově velmi náročné. Velký problém představuje především její odfiltrování od ostatních zdrojů nejistot. Z dosavadních měření, ale vyplývá, že pro výslednou hodnotu nejistoty stanovené způsobem B není rozhodující. Zejména pokud je časově i prostorově postihnout celý měrný profil. [6]

Nejistota ve stanovení průřezové rychlosti (průtoku) v měrném profilu- p_{Bm}

Její hodnota je závislá zejména na počtu a pozici svislic v měrném profilu. Hodnoty se přejímají z následující tabulky. Mezilehlé hodnoty se dopočítají interpolací. [2]

Tabulka 13- Relativní nejistota ve stanovení průřezové rychlosti v % na hladině spolehlivosti 95 % v závislosti na počtu svislic a použité metodě vyhodnocení [2]

Počet svislic	Metoda integrace hloubky-rychlost		Metoda mezisvislicových pásů		Metoda svislicových pásů	
	Šířka měrného profilu [m]		Šířka měrného profilu [m]		Šířka měrného profilu [m]	
	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0
12	1,9	1,6	2,9	2,3	6,2	4,0
10	2,0	1,6	2,9	2,5	6,4	4,7
8	2,5	1,9	4,7	3,3	6,6	5,3
6	2,8	2,4	5,1	3,7	7,5	6,1
5	2,9	2,8	6,4	4,3	10,3	6,9
4	3,3	3,1	7,6	4,9	12,8	10,3
3	5,1	4,2	9,3	9,6	19,0	20,5

7 LABORATORNÍ VÝZKUM

7.1 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem provedení výzkumu bylo ověření použitelnosti EMI měřidel při měření průtoku plošnou integrační metodou. Dostupné normy, zejména norma ČSN EN ISO 748, se zaměřují především na popis měření rychlosti proudění (průtoku) v profilech o volné hladině otevřených. Metrologický předpis pro provádění úředních měření MP 010 doposud povoloval provádění úředních měření plošnou integrační metodou pouze pomocí vodoměrných vrtulí. Realizace úředních měření EMI měřidly za použití plošné integrační metody v tomto dokumentu doposud nebyla popsána.

7.2 POUŽITÁ EMI MĚŘIDLA

Výzkum byl proveden s dvěma EMI měřidly- *MF pro* od firmy OTT Hydrometr a *Flo-Mate 2000* od firmy MARSH McBIRNEY. Obě měřidla jsou blíže popsána v kapitole 3.3.5.

První zmíněné měřidlo je ve vlastnictví laboratoře LVV. Zároveň bylo pro účely výzkumu podrobena kalibraci. Kalibrace byla provedena v Akreditované kalibrační laboratoři vodoměrných měřidel VÚVH v Bratislavě. Touto akreditovanou laboratoří byla stanovena kalibrační rovnice pro měřidlo *MF pro*:

$$v_{EMIkor} = 1,0353 \cdot v_{EMI} \quad (7.1)$$

kde

v_{EMIkor} - korigovaná hodnota vycházející z v_{EMI} [m/s],

v_{EMI} - rychlost vykazovaná na displeji vyhodnocovací jednotky EMI měřidla *MF pro* [m/s].

Dále pro toto měřidlo byla stanovena hodnota nejistoty p_{Be} ve smyslu (6.1) korigované rychlosti menší než 1,0 m/s, která se pohybuje na hodnotě 2,5 % (95 %, $k_U=2$).

Druhé zmíněné měřidlo bylo pro účely výzkumu zapůjčeno od Brněnských vodovodů a kanalizací a nebylo podrobena kalibraci.

Snímače obou měřidel byly upevněny na tyči o průměru 9 mm. Naměřené hodnoty rychlostí byly odečítány na displeji vyhodnocovacích jednotek. Pojezdové zařízení bylo propojeno s jednotkou OKM3- 2M, ke které byl připojen přenosný počítač. Ten sloužil

pro započítání pohybu pojezdu. Pro naprogramování pohybu pojezdu sloužil program Integrate, který pro toto měření vytvořil Ing. Pavel Zubík, Ph.D. Program vypočítával dobu pohybu na základě zadané rychlosti pojezdu a vzdálenosti, kterou má pojezd urazit.

7.3 VYUŽITÉ LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ

Veškeré měření probíhalo na žlabu o šířce 1,0 m, který je znázorněn na obr. 19. Žlab je umístěn v přízemí budovy B Fakulty stavební VUT v Brně. Je také součástí Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb. Laboratoř je dlouhodobě používána pro vědeckovýzkumnou činnost, pro pedagogické účely a v neposlední řadě na pracovišti působí již mnoho let měřicí skupina autorizovaná k provádění úředních měření průtoků. [15]

Tato laboratoř byla vybudována už ve dvacátém století. O její výstavbu se zasloužil především profesor Smrček. Bylo rozhodnuto, že pro standardní laboratoř se vyčlení 295 m² plochy. Snaha byla, aby na této ploše byl umístěn jak hydraulický žlab (obr. 21), tak žlab, který by umožňoval výstavbu říčních modelů (obr. 22). Standardní hydraulický žlab je sestaven ze skleněných dílců o výšce 0,9 m, jeho šířka je 1 m, délka 15 m. Výšku hladiny je možno nastavit pomocí vertikálních žaluzií na konci žlabu. Žlab pro říční modelování je betonový, o šířce 3,5 m a délce 21,1 m. Po posouzení několika plánů nakonec bylo vybráno řešení, kdy jsou oba žlaby umístěny nad sebou. Její vybudování bylo velmi náročné, především z důvodu 1. světové války, kdy se z budovy B stala dočasná nemocnice pro raněné vojáky. Stavba tedy musela probíhat za co nejmenších otřesů a s nimi spojeným hlukem, aby ranění měli klid na léčbu. Vybudování celé laboratoře bylo konzultováno i se zahraničními odborníky, například s profesorem Engelsem z Drážďan nebo s profesorem Schaffernakem z Vídně. [8][15]

Hydraulický okruh v této laboratoři je složen z podzemní nádrže o objemu 59,9 m³, čerpací stanice a dvou měrných žlabů. Čerpání vody je realizováno pomocí dvou ponorných čerpadel. Tato čerpadla, pokud jsou v běhu souběžně, jsou schopna dodat maximálně 160 l/s. Nátok do jednotlivých žlabů je realizován pomocí nádrže a měrného přelivu Thompsonova typu. Pro Thompsonův přeliv instalovaný na použitém hydraulickém žlabu platí rovnice:

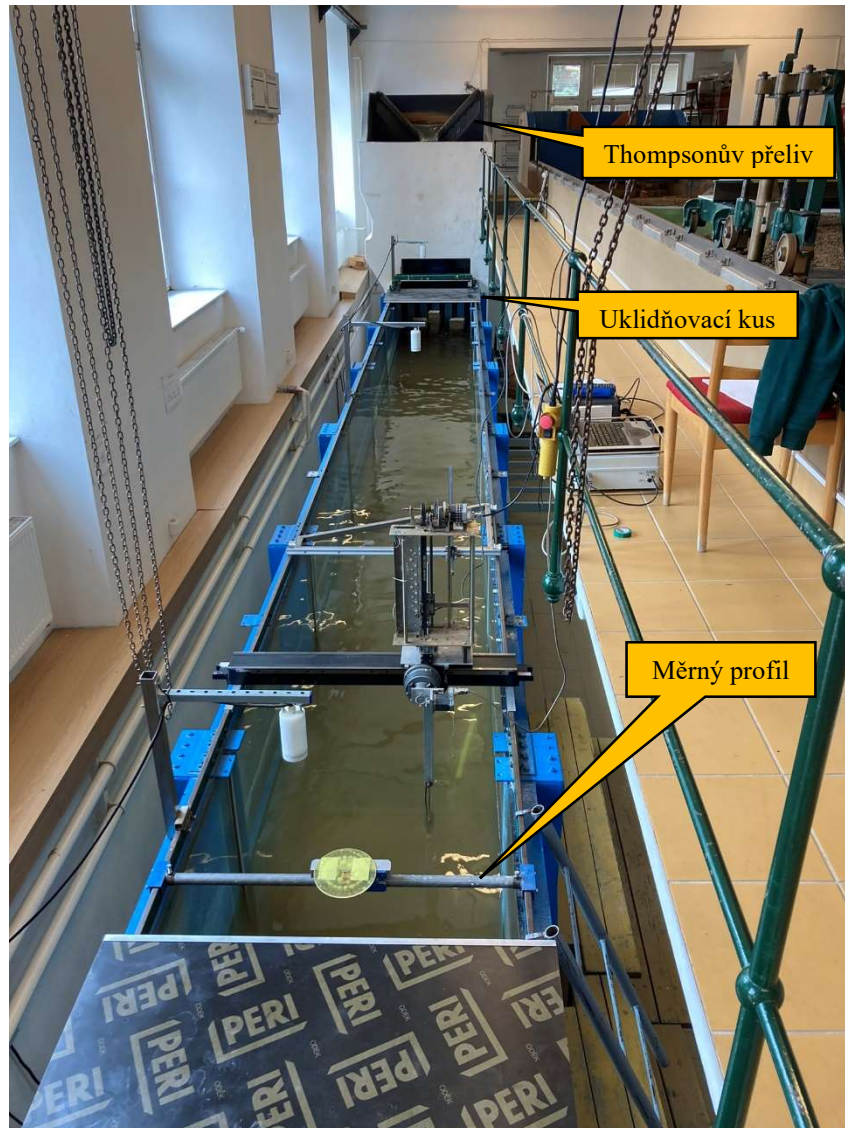
$$Q = 1,3676(h + 0,0137)^{2,5906} , \quad (7.2)$$

kde

Q - průtok [l/s],

h - výška hladiny [m].

Díky těmto přelivům a jednoznačným vztahovým rovnicím mezi výškou hladiny a průtokem, je možné přesné dopočtení aktuálního průtoku. Odtok z měrných žlabů je sváděn zpět do podzemní zásobní nádrže. [15]



Obr. 21) Protiproudění pohled na hydraulický žlab v budově B



Obr. 22) Žlab pro říční modelování v budově B

7.4 POSTUP MĚŘENÍ

Provedený výzkum byl realizován na měrném žlabu v budově B zobrazeném na obr.21. Daný žlab je 1,005 široký, 15 m dlouhý s prosklenými stěnami o výšce 0,9 m. Jako vztažné rychlosti proudění byly vybrány hodnoty 0,1 m/s, 0,3 m/s a 0,5 m/s. Přesné hodnoty rychlosti proudění byly vyhodnocovány na základě 10 měření, která probíhala bodově bez pohybu měřidlem v 5 různých vzdálenostech ode dna (v každém bodě bylo měřeno dvakrát). Z těchto deseti měření byl následně spočítán průměr, ten byl považován za vztažnou rychlost k posouzení hodnoty rychlosti proudění, kterou vyhodnotilo měřidlo při plošné integrační metodě. Měření probíhalo při hloubkách vody okolo 0,4 m. Tato hloubka byla vybrána s ohledem na podmínky nastávající v prizmatických kanálech, na

kterých se často měření provádějí. Hloubka vody byla odečítána na hrotovém měřidle s teoretickou přesností 0,1 mm. Reálný průtok byl odečítán na digitálním displeji umístěným na zdi nad žlabem. Současně byl ověřován pomocí měření výšky přepadového paprsku Thompsonova přelivu. Průtok pak byl vypočítán podle rovnice (7.2).

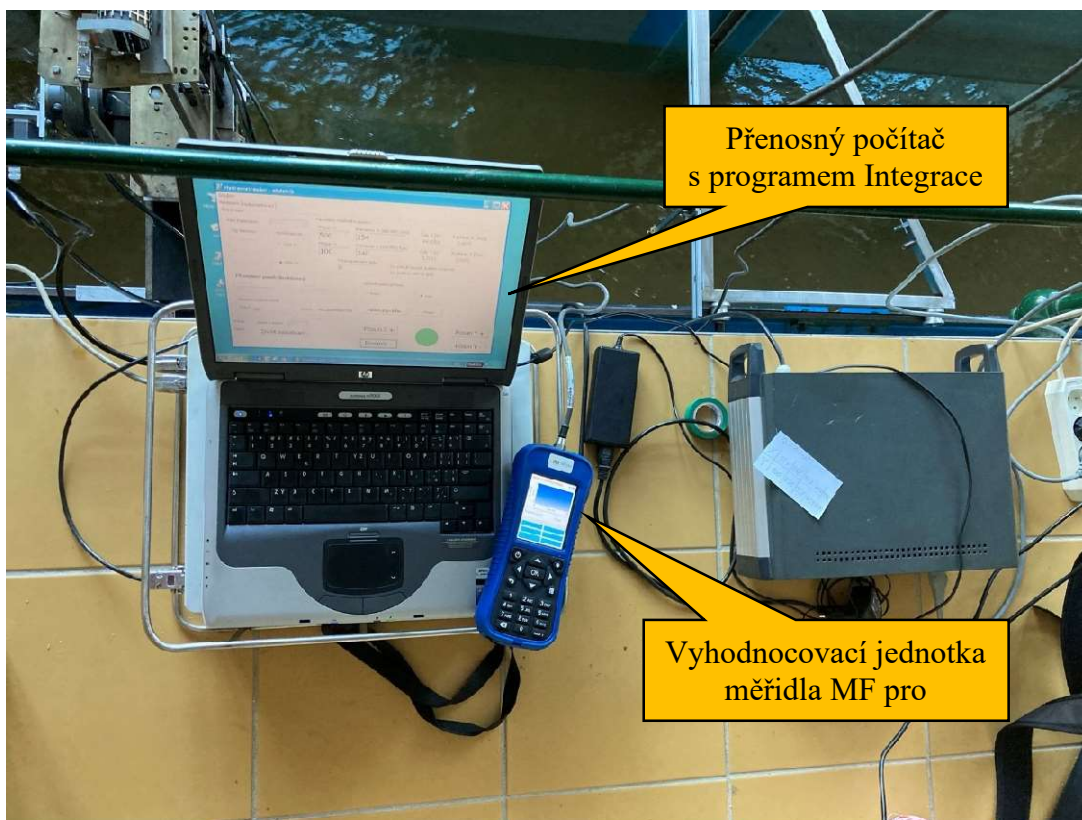
Celkově byly provedeny 2 sady pro každou vztažnou rychlost za použití měřidla *MF pro* a 1 sada měření s měřidlem *Flo-mate 2000*. Každá sada obsahovala 100 měření, to znamená, že dohromady bylo provedeno 900 měření, 600 s měřidlem *MF pro*, 300 s měřidlem *Flo-mate 2000*.

Obě EMI měřidla byla upevněna na tyči o průměru 9 mm, tyč byla spojena s mechanickým pojezdem. Celá sestava byla propojena kabelem s přenosným počítačem. Na něm byl nainstalován program, který umožňoval výpočet doby pojezdu. Zároveň díky tomuto programu byl zahajován pojezd měřící sestavou. Vyhodnocovací jednotka a počítač s programem integrace jsou zobrazeny na obrázku 23.

Měřidlem bylo pohybováno ve směru horizontálním i vertikálním. Měření v horizontálách probíhalo v hloubce 10 cm ode dna a zároveň 20 cm od kraje, měření ve vertikálách probíhalo ve vzdálenosti 10 cm ode dna. Tyto vzdálenosti zajistily, že do měření nevstupovaly hydraulické jevy probíhající poblíž stěn. Aby doba pojezdu nebyla při vyšších rychlostech pojezdu příliš krátká, bylo nutné v některých měřeních pohybovat měřidlem tam a zpět napříč měrným profilem.

Před započítáním měření bylo nutné vždy provést justaci nuly. Měřidlo bylo umístěno do nádoby s vodou, aby se docílilo nulové rychlosti vody. Společně s justací nuly probíhalo měření měrné vodivosti vody pomocí přenosného konduktoměru DiST 3 EC Tester. Dále také bylo nutné nastavit požadovaný průtok a hladinu. Velikost průtoku byla nastavována na ovládacím panelu čerpací stanice laboratoře pomocí volby frekvence čerpadel. Výška hladiny byla nastavována pomocí vertikálních žaluzií na konci měrného žlabu.

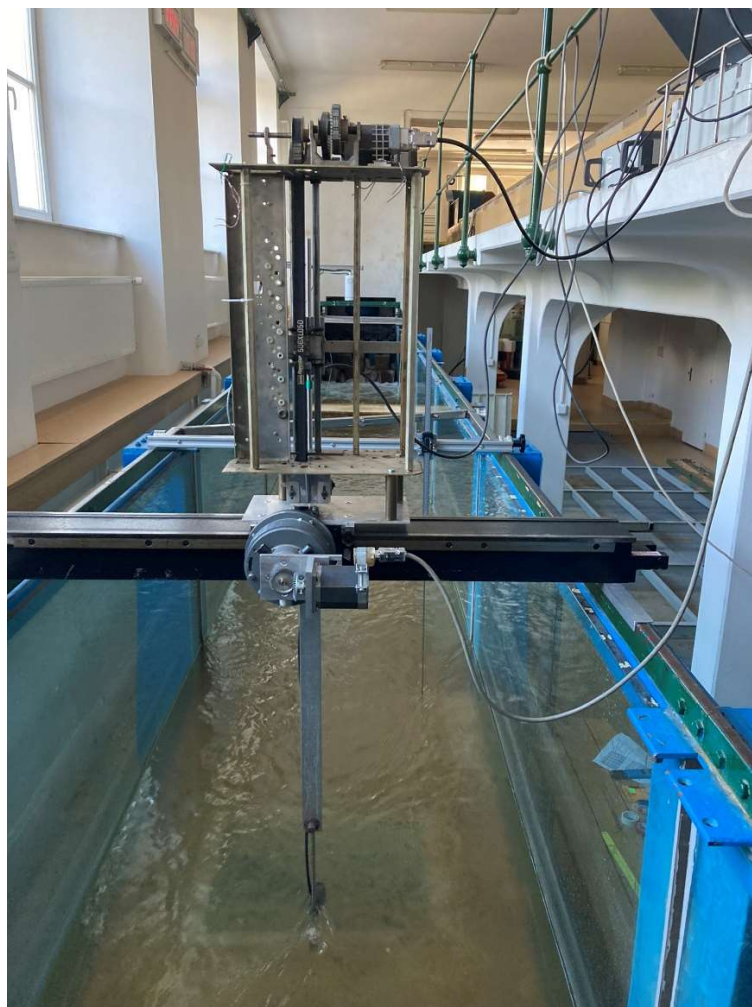
Každé měření pak probíhalo tak, že se nejprve v programu spočítal čas potřebný pro pojezd měřidlem závislý na počtu period pojezdu tam a zpět, které mělo měřidlo urazit, a zvolené rychlosti pohybu. Na vyhodnocovací jednotce EMI měřidla se následně nastavil čas stejný. Jako první byl vždy odstartován pojezd měřidla. Mezi dobou odstartování pojezdu a dobou započítání měření byl vynechán čas 1 sekundy z důvodu, aby bylo možné ovládat oba přístroje zvlášť. Také aby integrační měření probíhala s měřidlem již v pohybu, nikoliv rozjíždějícím se.



Obr. 23) Přenosný počítač a vyhodnocovací jednotka měřidla MF pro

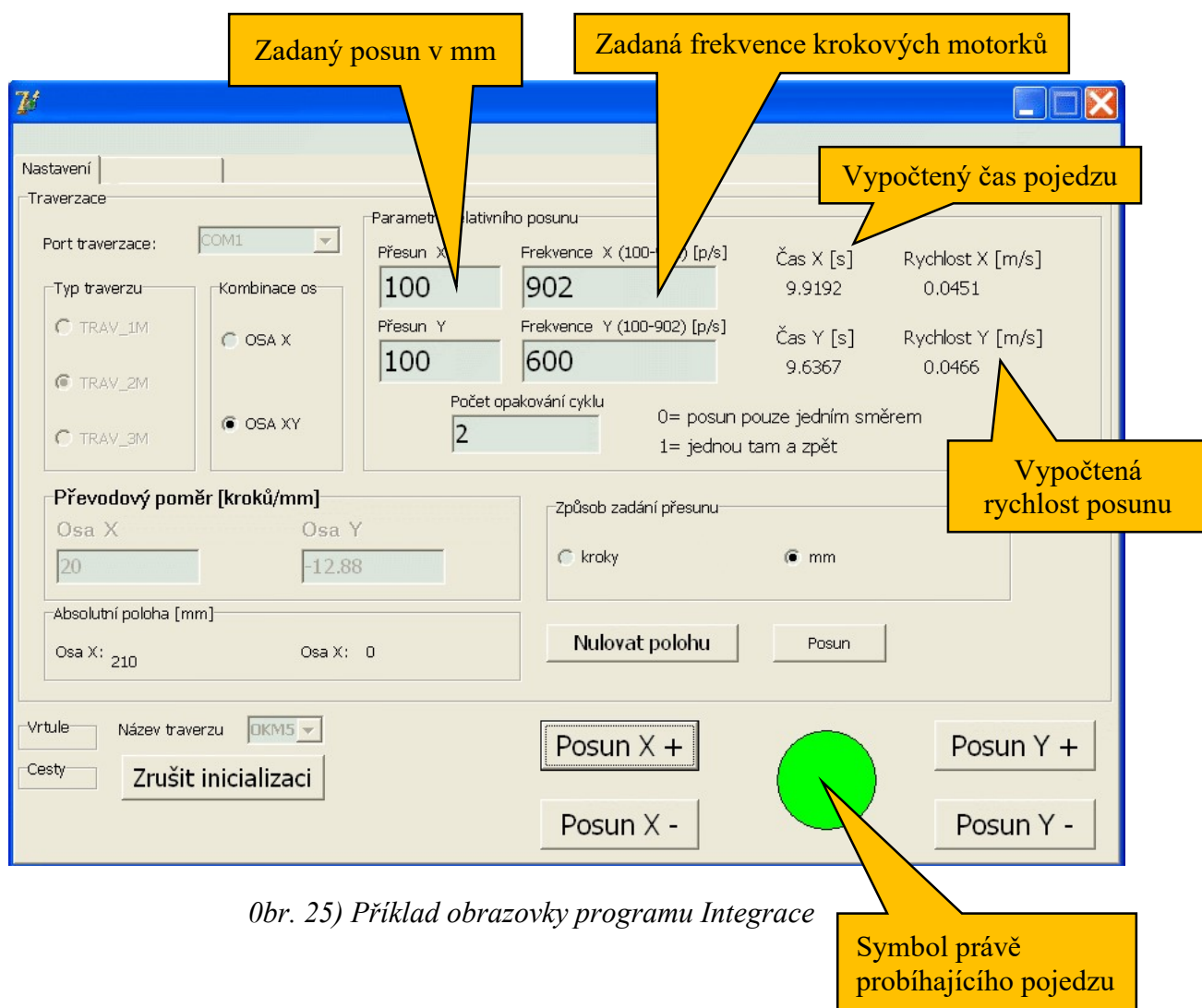
7.4.1 Traverzační zařízení

Pro zajištění plynulého pohybu EMI měřidel po měrném profilu bylo naistalováno na měrný žlab 100 traverzační zařízení. Celé traverzační zařízení (obr. 24) bylo upevněno na ocelovém nosníku, který byl instalován přes celou šířku měrného profilu. Zvolené rychlosti pohybu byly v rozmezí 0,45-2,7 m/min. Měřidlem bylo posouváno po předem určených drahách- horizontálách a vertikálách.



Obr. 24) Traverzační zařízení sloužící pro automatický a plynulý pohyb EMI měřidla instalované na žlabu 100

7.4.2 Program Integrace



Obr. 25) Příklad obrazovky programu Integrace

Z obr. 25 lze vidět, že program integrace na základě délky posunu a dané frekvenci krokových motůrků vypočítal čas a rychlost posunu. Délka posunu byla pro jednotlivá měření v horizontálním a vertikálním směru podobná. Na základě zvolených odstupů ode dna a stěn byla dopočítána délka pojezdu. Posun pro měření v horizontálním směru začínal 20 cm od krajů žlabu. Z toho vyplývá, že délka posunu nemohla být nikdy větší než 60 cm. Při měření ve vertikálním směru pojezd začínal 10 cm ode dna a končil těsně pod hladinou. Jelikož měření probíhala vždy při hloubce okolo 40 cm, délka posunu byla v tomto případě menší a nesměla přesáhnout 30 cm.

Zároveň je na obrazovce vidět, že se vybíralo mezi přesunem X a přesunem Y. Přesun X platil pro horizontální posun. Posun probíhal ve smyslu X+, pokud se měřidlo mělo pohybovat směrem doprava nebo ve smyslu X-, pokud se pohybovalo měřidlem doleva.

Přesun Y znamenal vertikální posun. Ve smyslu Y+ se měřidlem pohybovalo ode dna k hladině, v případě Y- se pohybovalo měřidlem od hladiny ke dnu.

V programu bylo možno nastavit počet opakování cyklu. Více cyklů se využívalo pro měření, kdy byla zvolena vyšší rychlost, aby doba měření nebyla příliš krátká. Jeden cyklus znamená pojezd tam a zpět.

7.5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola bude blíže zaměřena na zhodnocení provedených měření. Výsledky jednotlivých měření jsou zpracovány do tabulek, které jsou součástí příloh práce. Zároveň jsou z vyhodnocených výsledků sestrojeny grafy. V grafech jsou barevně rozlišena měření pro jednotlivé vztažné rychlosti proudění- 0,1 m/s, 0,3 m/s, 0,5 m/s. Jednotlivé body vyhodnocené z 10 opakování jednotlivých měření jsou proloženy spojnicí trendu.

Součástí výzkumu bylo i provedení měření při nulové rychlosti proudění vody. Prokázalo se, že obě EMI měřidla při nulové rychlosti negenerují neexistující rychlosti. Naměřené hodnoty jsou v příloze č. 10 a č. 11.

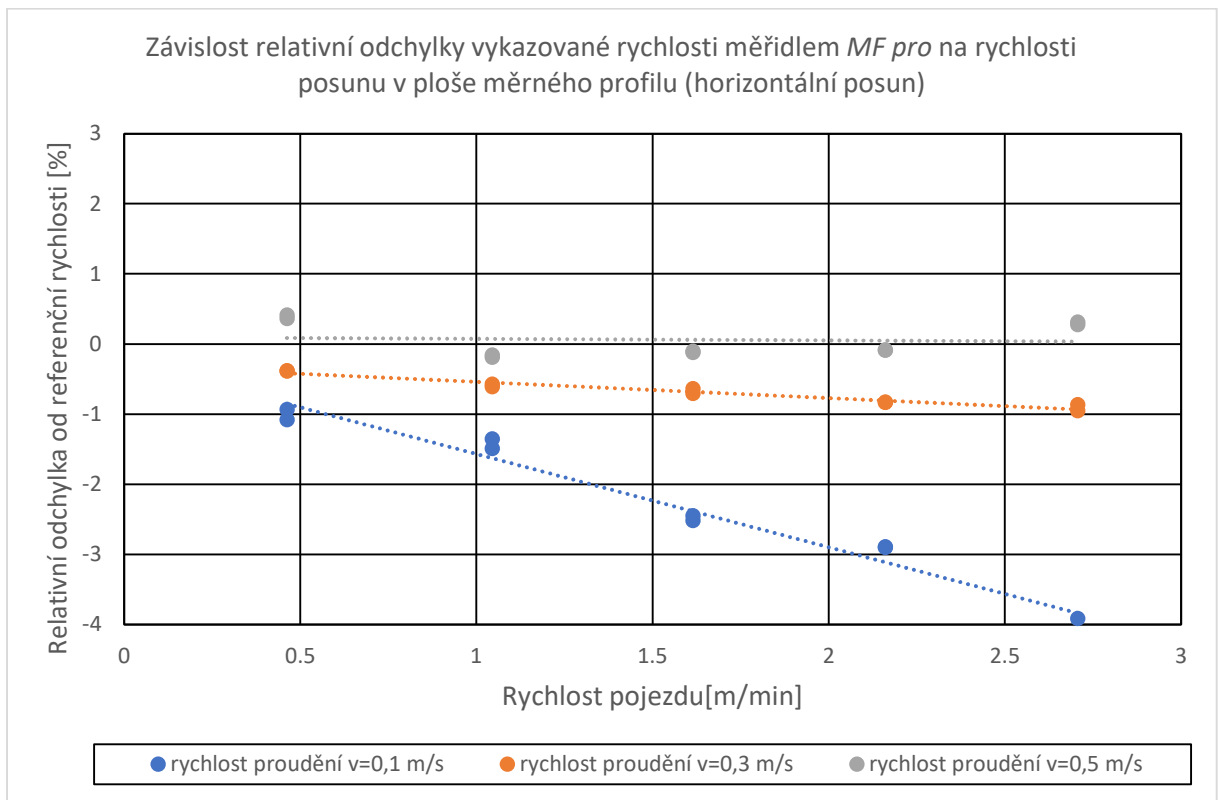
7.5.1 Spojnice trendu

Spojnicí trendu je myšlena křivka, která nejlépe prokládá body v grafu. Existuje několik typů spojnic trendu- lineárního typu, logaritmického typu (pro rychle rostoucí nebo klesající hodnoty), polynomického typu (pro kolísající data), napájecího typu (pro porovnávání naměřených hodnot), exponenciálního typu a klouzavý průměr. Lze také zobrazit spolehlivost R spojnice trendu. Platí, že čím více se hodnota spolehlivosti blíží číslu 1, tím větší je její míra spolehlivosti. [16]

7.5.2 Měřidlo *MF pro*

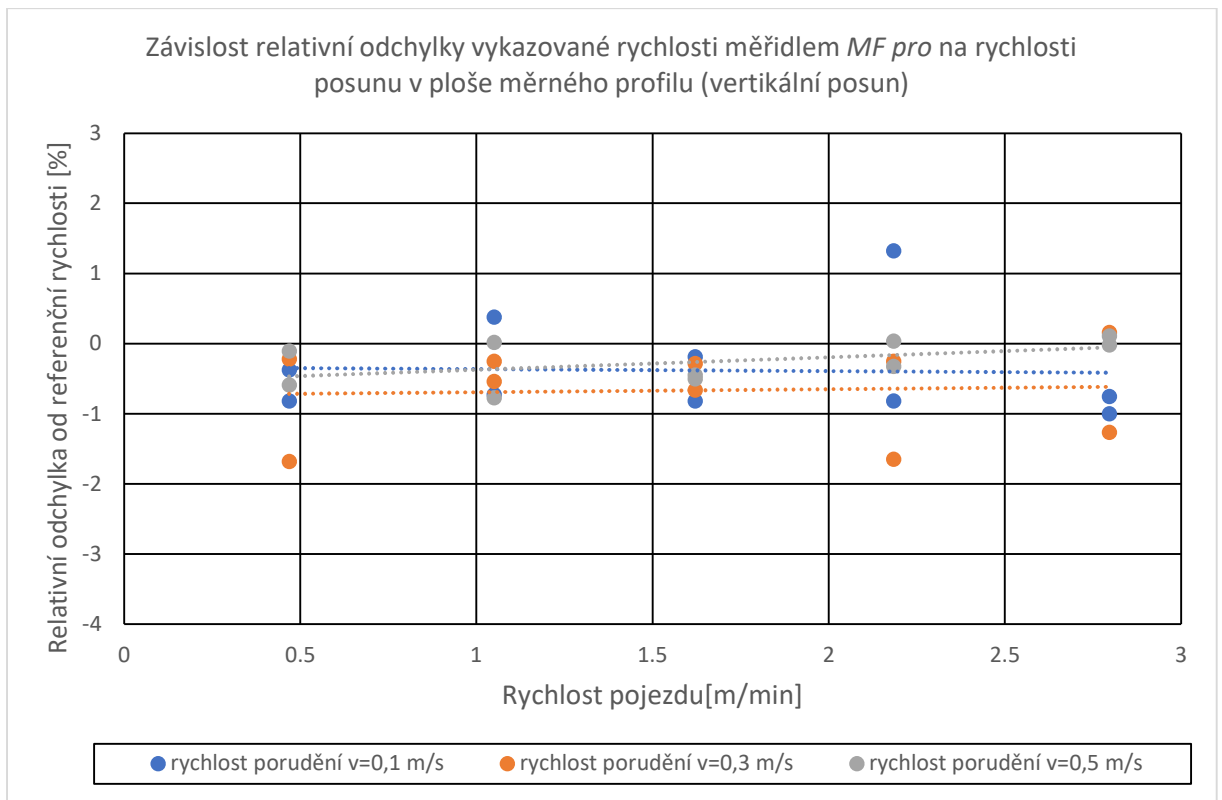
Při měření měřidlem *MF pro* byly realizovány 2 sady měření, každá po 300 měřeních. Měřidlo se pohybovalo po předem daných horizontálních a vertikálních drahách. V obou směrech bylo s měřidlem pohybováno pěti různými rychlostmi v rozmezí hodnot od 0,46 m/min až 2,71 m/min. Hodnota 0,46 m/min je minimální, kterou je daný pojezd schopný uskutečnit. Hodnota 2,71 m/min je naopak maximální, kterou lze pomocí pojezdu uskutečnit. Pro každou rychlost pojezdu bylo v každé sadě provedeno 10 měření.

Z toho vyplývá, že jak v horizontálním, tak vertikálním směru bylo realizováno vždy 50 měření pro každou vztažnou rychlost proudění.



Obr. 26) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody

Na obr. 26 je zobrazen graf, který představuje závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti pojezdu v horizontálním směru. Jak je z grafu patrné, při zvyšující se rychlosti pojezdu relativní odchylka roste. Při rychlostech proudění 0,3 m/s a 0,5 m/s je vliv rychlosti posunu téměř neznamatelný. V případě vztažné rychlosti 0,3 m/s se relativní odchylka pohybuje v rozmezí od $-0,38\%$ do $-0,95\%$. Pro vztažnou rychlost 0,5 m/s se relativní odchylka pohybuje v rozmezí hodnot od $-0,16\%$ do $0,41\%$. Největší relativní odchylky je dosahováno při vztažné rychlosti proudění 0,1 m/s při současné rychlosti pojezdu 2,71 m/min. Tyto relativní odchylky nabývají hodnot od $-0,93\%$ do $-4,06\%$. Během výzkumu nebyla zjištěna příčina takto velkých relativních odchylek při malých rychlostech proudění. Z grafu je také patrné, že většina relativních odchylek se nachází v záporné části osy y. Tato skutečnost poukazuje na fakt, že měřidlo vykazuje menší rychlost, než je rychlost referenční.



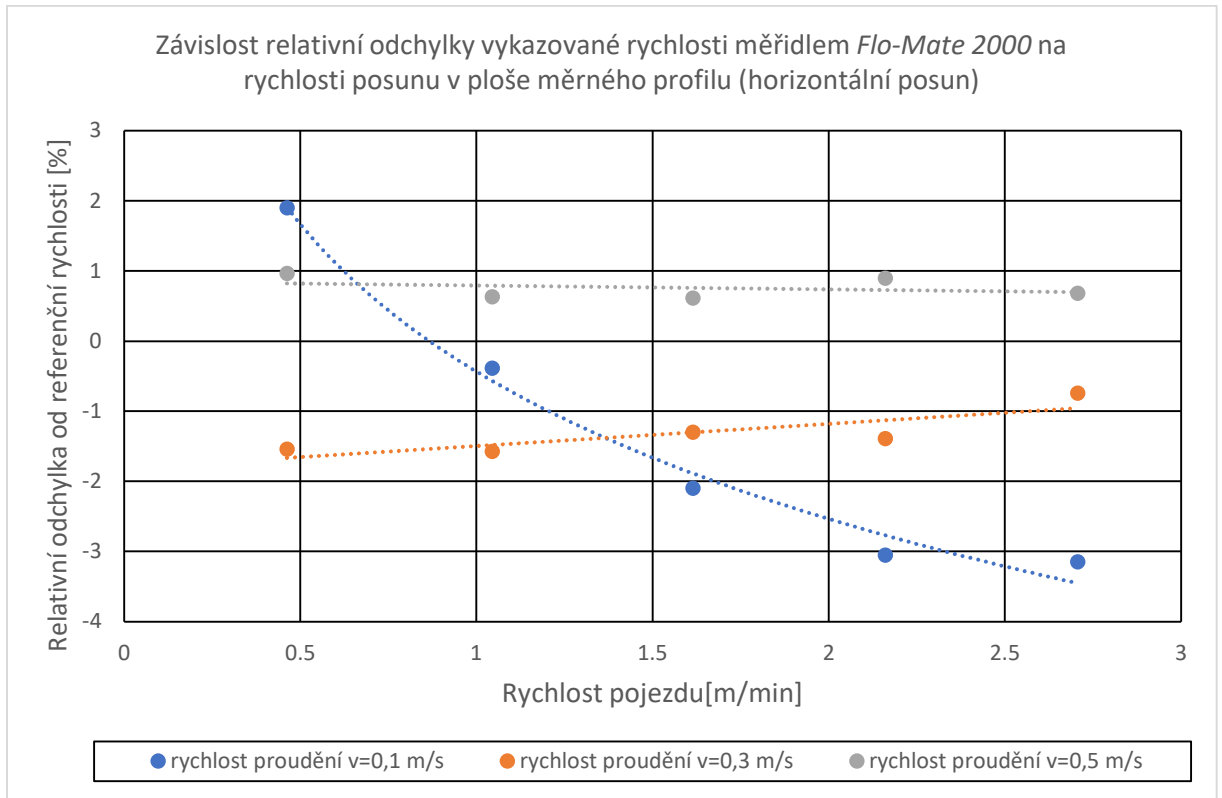
Obr. 27) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody

U posunu ve vertikálním směru lze z obr. 27 vypočítat, že relativní odchylky pro všechny referenční rychlosti jsou podobné. Zároveň se většina relativních odchylek pohybuje pod absolutní hodnotou 1 %, to znamená téměř neznamatelný vliv rychlosti posunu měřidla na vykazovanou rychlost. Lze konstatovat, že naprostá většina relativních odchylek je záporné hodnoty. Z toho lze usuzovat, že měřidlo vykazuje nižší rychlost proudění, než která v korytě opravdu proudí. Relativní odchylky pro vztažnou rychlost proudění $v = 0,1$ m/s se pohybují v rozmezí hodnot od $-0,98\%$ do $1,32\%$. Pro vztažnou rychlost proudění $v = 0,3$ m/s se pohybují v intervalu od $-0,22\%$ do $-1,68\%$. A v případě vztažné rychlosti $v = 0,5$ m/s se relativní odchylka pohybuje v rozmezí hodnot od $0,11\%$ do $-0,77\%$. Hodnoty relativních odchylek jsou v porovnání s hodnotami relativních odchylek pro horizontální posun mírně vyšší, s výjimkou nejnižší rychlosti proudění vody. Zároveň se odchylky nabývající takovýchto hodnot projeví u obou sad měření.

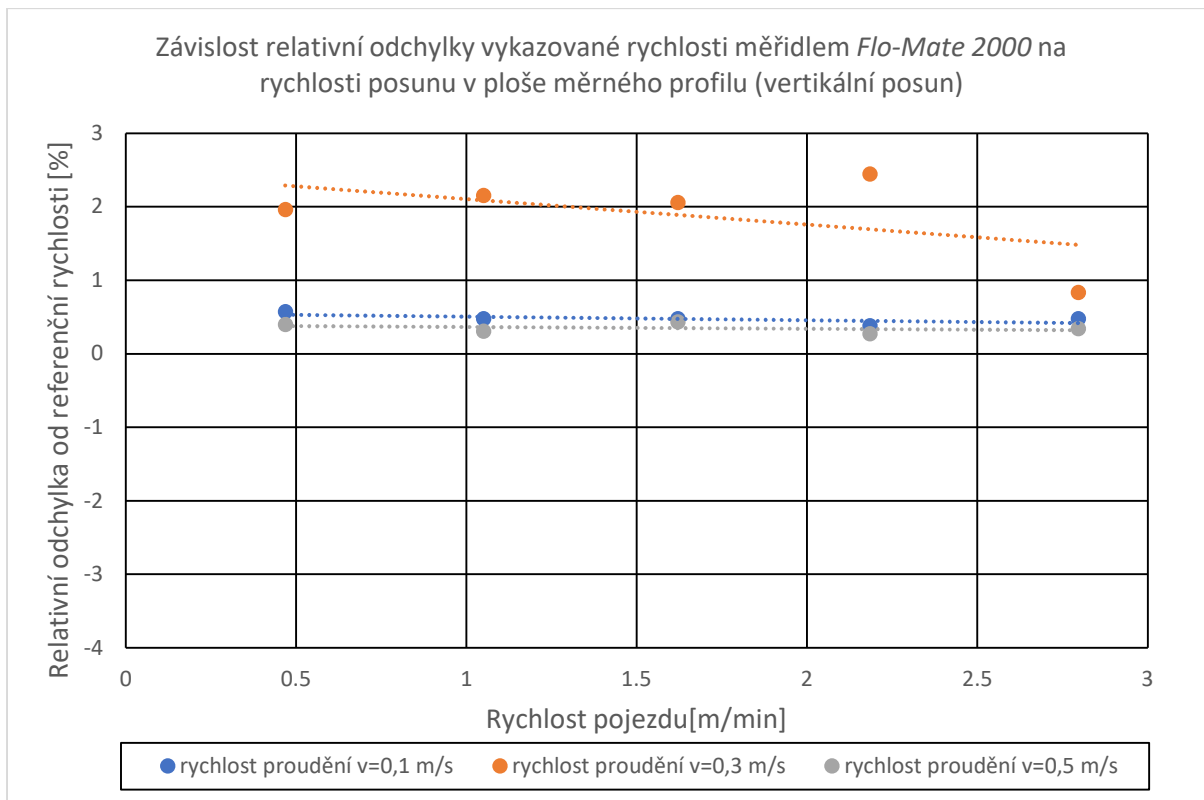
7.5.3 Měřidlo Flo-Mate 2000

Měřidlo *Flo-Mate 2000* bylo pro účely výzkumu zapůjčeno od Brněnských vodovodů a kanalizací a nebylo podrobena kalibraci. V případě tohoto měřidla byla provedena pouze jedna sada měření se 100 měřeními. Z toho 50 bylo realizováno ve vertikálním a

50 ve směru horizontálním. Měření v obou směrech probíhalo při 5 různých rychlostech pojezdu. Tyto rychlosti jsou shodné s rychlostmi pojezdu v případě měřidla *MF pro*, aby obě měřidla bylo možné následně mezi sebou porovnat.



Obr. 28) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody. Z grafu na obr. 28 lze pozorovat podobné trendy jako na obr. 26. Stejně jako u měřidla *MF pro* platí i pro měřidlo *Flo-Mate 2000*, že pro rychlosti proudění $v=0,1$ m/s je relativní odchylka největší. Zároveň při této rychlosti nastává trend, kdy se se zvyšující rychlostí zvyšuje i relativní odchylka. Měřidlo tím pádem vykazuje nižší rychlost, než je rychlost referenční. U rychlostí proudění v rozmezí hodnot 0,3 m/s a 0,5 m/s je vidět, že vliv rychlosti pojezdu na vykazovanou rychlost je malý. Při vztažné rychlosti $v=0,1$ m/s se relativní odchylka pohybuje v intervalu hodnot od 1,91 % do $-3,14$ %, při $v=0,3$ m/s od hodnoty $-0,74$ % do hodnoty $-1,57$ % a pro vztažnou rychlost proudění $v=0,5$ m/s je relativní odchylka v intervalu od 0,62 % do 0,97 %.



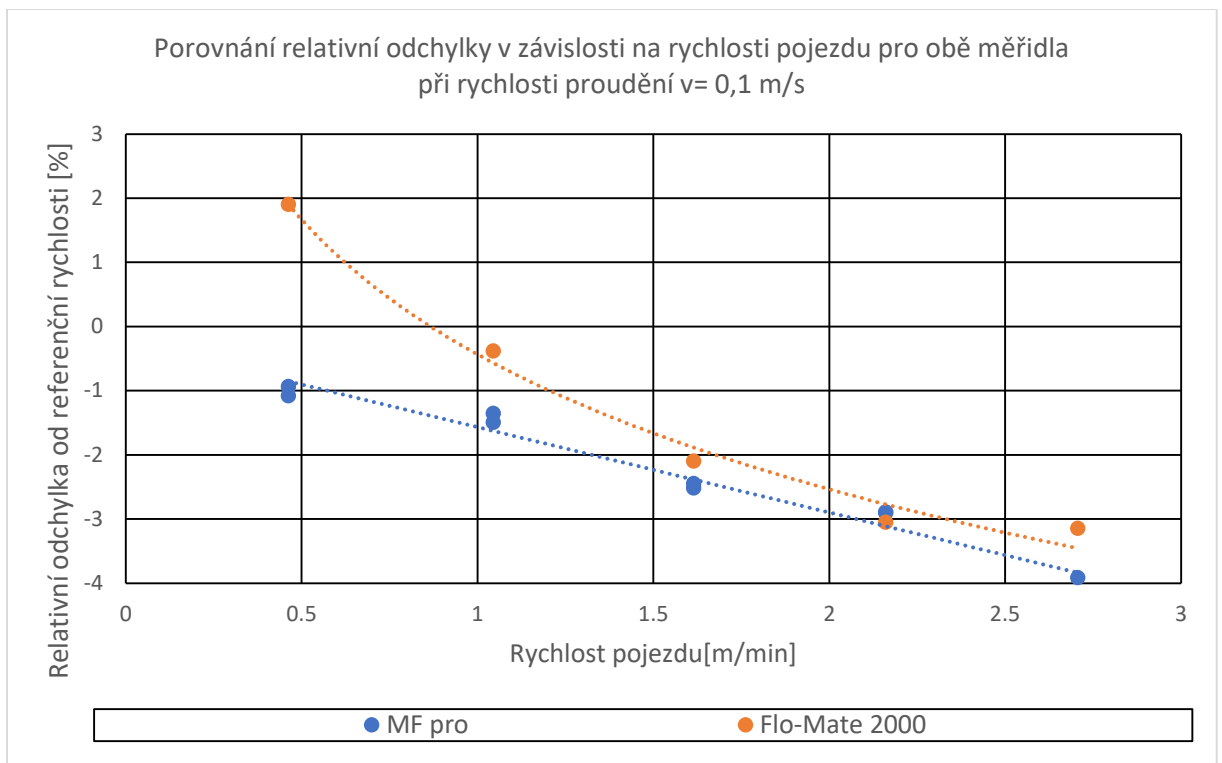
Obr. 29) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojazdu při různých rychlostech proudění vody

Z grafu na obr. 29 je patrné, že změna hodnoty relativní odchylky od referenční rychlosti není jednoznačně závislá na rychlosti pojazdu ani rychlosti proudění. Hodnoty relativních odchylek pro vztažné rychlosti $v=0,1$ m/s a $v=0,5$ m/s jsou téměř totožné. Pohybují se v intervalu hodnot od 0,27 % do 0,57 %. Relativní odchylky pro vztažnou rychlost $v=0,3$ m/s nabývají hodnot od 0,83 % do 2,44 %. Všechny relativní odchylky jsou kladné, to poukazuje na fakt, že měřidlo vykazuje vyšší rychlost proudění, než je rychlost referenční. Proč se relativní odchylka při rychlosti proudění 0,3 m/s tak výrazně liší od situace, kdy voda proudí rychlostí 0,1 m/s a 0,5 m/s, se nepodařilo zjistit.

7.5.4 Porovnání obou měřidel

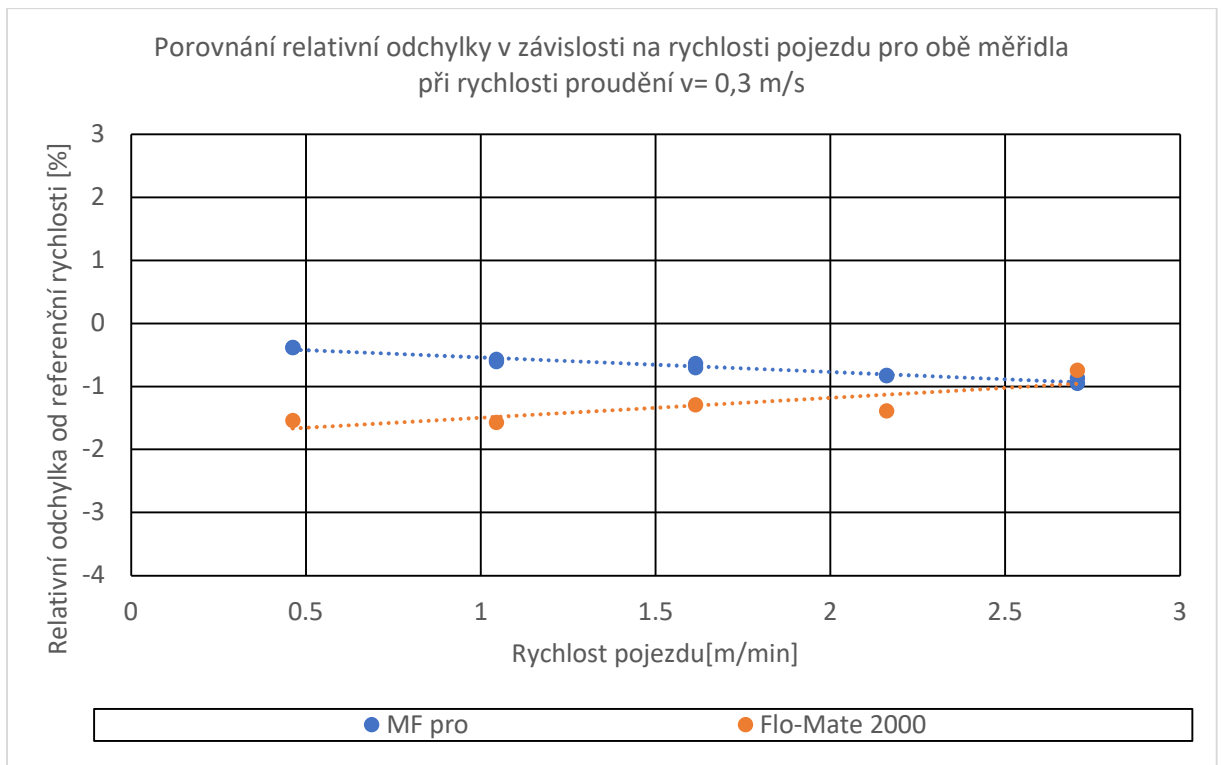
V případě porovnání obou měřidel jsou vždy porovnávány relativní odchylky rychlosti od referenční rychlosti a rychlosti posunu. Stejně jako u vyhodnocení jednotlivých měření pro obě měřidla, jsou bodové výsledky proloženy spojnicí trendu. Ve všech grafech jsou vždy barevně oddělena měření pro jednotlivá měřidla.

7.5.4.1 Horizontální posun



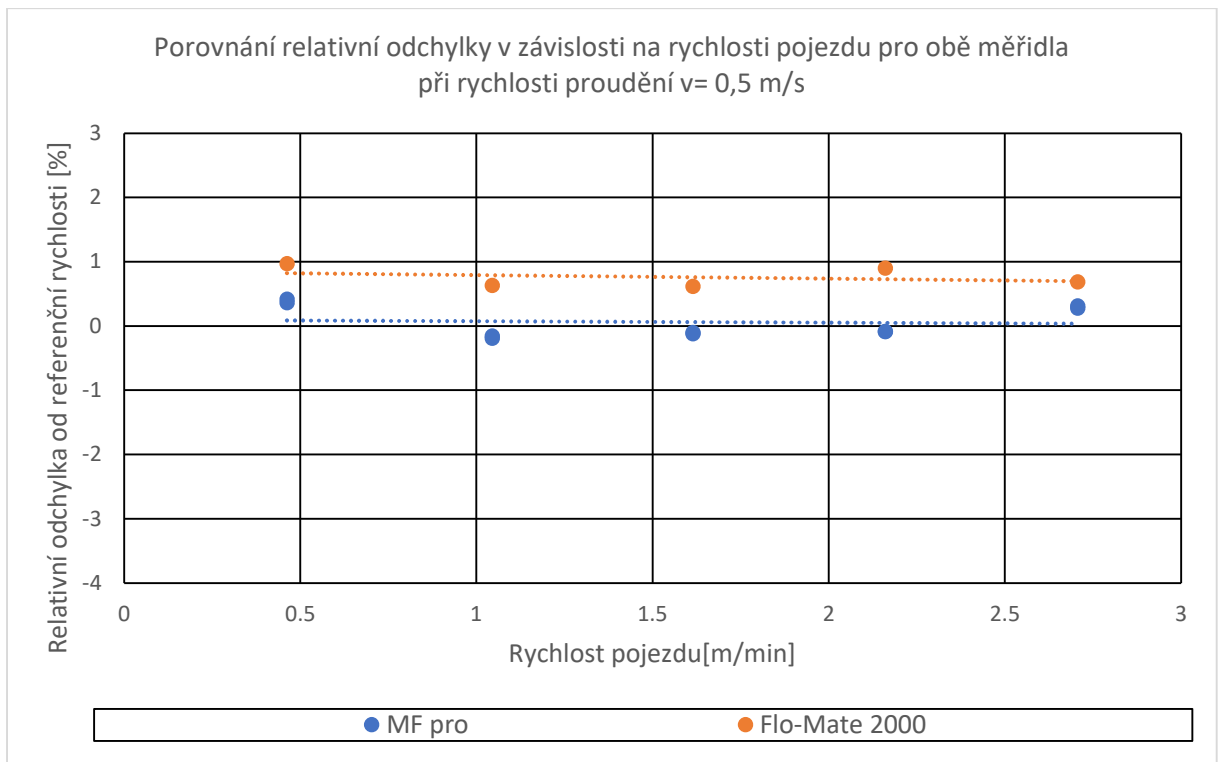
Obr. 30) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v = 0,1 \text{ m/s}$

V grafu na obr. 30 jde vidět, že obě měřidla se při vztažené rychlosti proudění $v = 0,1 \text{ m/s}$ a horizontálním posunu chovají podobně. Při vzrůstající rychlosti pojezdu se zvyšuje i relativní odchylka. Všechny relativní odchylky měření měřidlem *MF pro* nabývají záporných hodnot. Zároveň většina hodnot relativní odchylky u měření měřidlem *Flo-mate 2000* taktéž nabývá záporných hodnot. Z toho lze usuzovat, že obě měřidla vykazují menší rychlosti proudění, než je rychlost referenční.



Obr. 31) Graf znázorňující závislost relativní odchyly měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v = 0,3 \text{ m/s}$

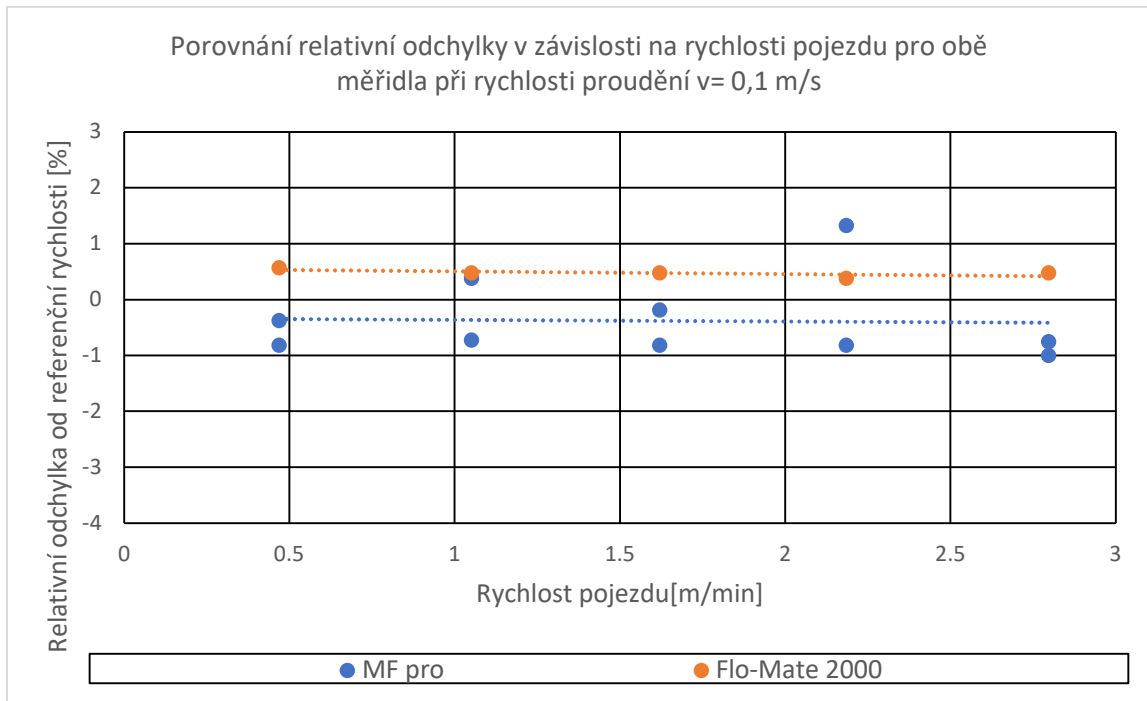
V případě vztažné rychlosti $v = 0,3 \text{ m/s}$ lze pozorovat v grafu na obr. 31 určité rozdíly v chování měřidel. Zatímco relativní odchylyka u měření měřidlem *MF pro* s rostoucí rychlostí pojezdu roste, relativní odchylyka u měření měřidlem *Flo-Mate 2000* s rostoucí rychlostí klesá. Zároveň si lze všimnout, že relativní odchylyka u měřidla *Flo-Mate 2000* je vyšší. Všechny hodnoty relativních odchylek nabývají záporných hodnot. Z toho taktéž lze usuzovat, že obě měřidla při horizontálním pohybu vykazují nižší hodnoty rychlosti, než je rychlost referenční.



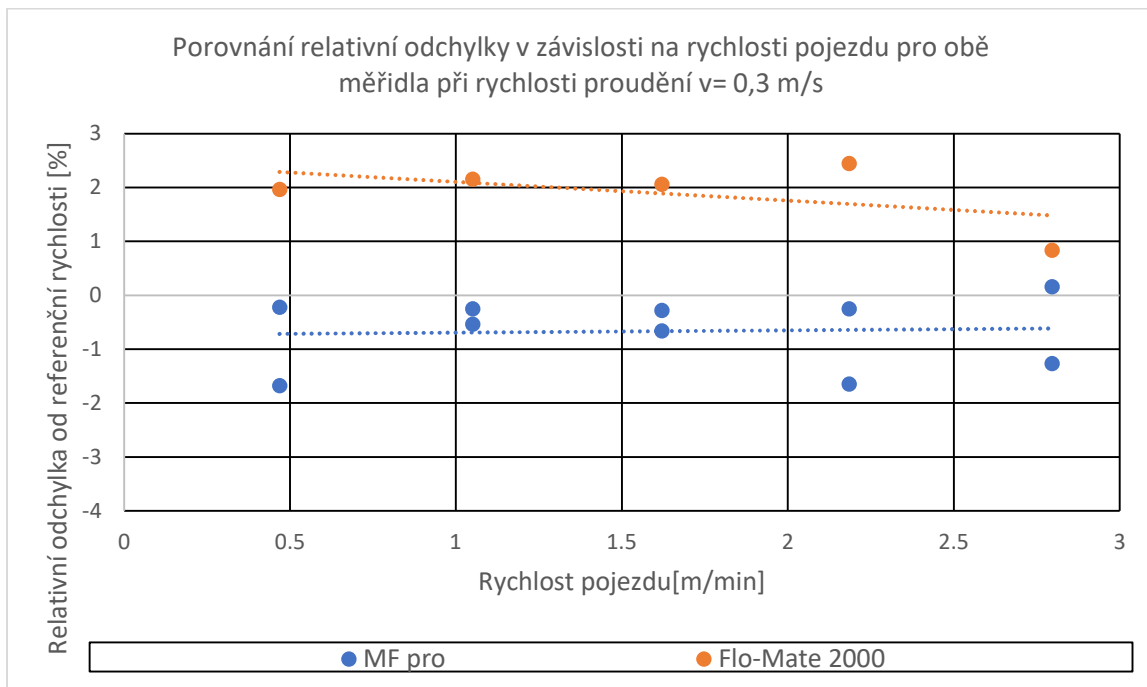
Obr. 32) Graf znázorňující závislost relativní odchyly měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v = 0,5 \text{ m/s}$

Z grafu na obr. 32 lze vyzorovat, že u vztažné rychlosti $v = 0,5 \text{ m/s}$ lze opět vidět u obou měřidel podobné chování. V obou případech se s rostoucí rychlostí pojezdu relativní odchylnka téměř nemění. Zároveň se dané odchylnky pro jednotlivá měřidla moc neliší, pro měřidlo *MF pro* hodnota relativní odchylnky kolísá okolo 0%, pro měřidlo *Flo-Mate 2000* se pohybuje pod hodnotou 1%. Z toho lze usuzovat, že pro měřidlo *MF pro* je vliv rychlosti pojezdu téměř neznatelný.

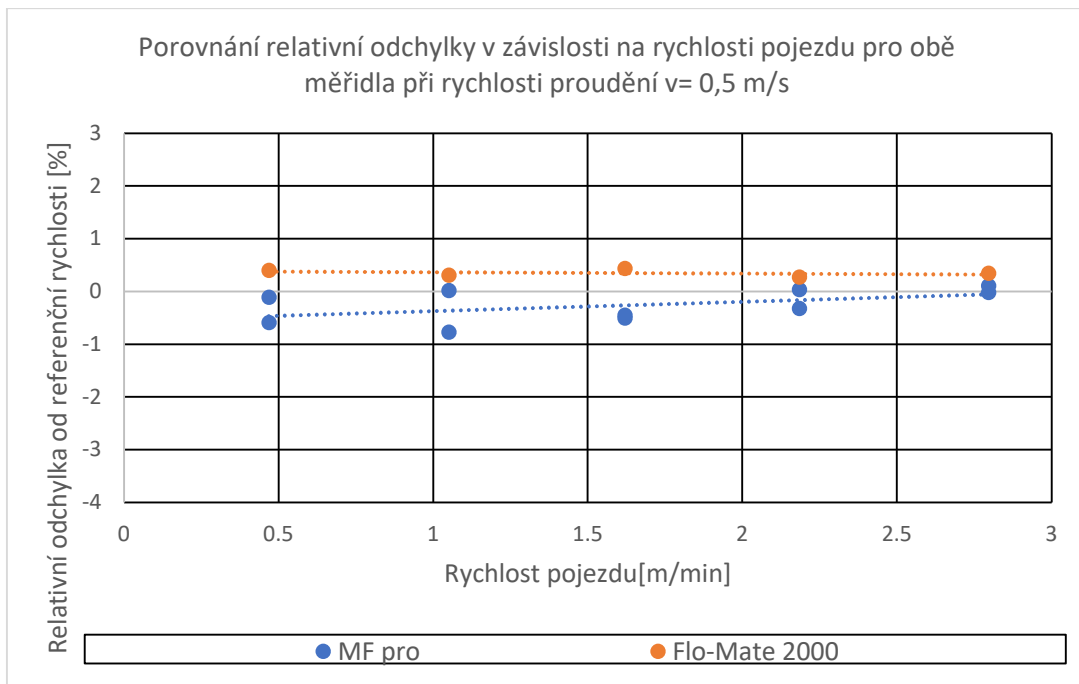
7.5.4.2 Vertikální posun



Obr. 33) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,1$ m/s



Obr. 34) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,3$ m/s



Obr. 35) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,5$ m/s

Z předešlých grafů na obr. 33 až obr. 35 lze vyčíst následující. Obě měřidla se při svislém pojezdu chovají podobně bez ohledu na rychlost pojezdu nebo na rychlost proudění. Přičemž měřidlo *Flo-Mate 2000* vykazuje větší stálost při různých rychlostech pojezdu, než vykazuje měřidlo druhé. Všechny body leží téměř v přímce. Relativní odchylky u tohoto měřidla nabývají pouze kladných hodnot, což znovu poukazuje na fakt, že dané měřidlo vykazuje rychlosti větší, než je rychlost referenční. U měřidla *MF pro* leží naopak převážná většina hodnot relativní odchylky v záporných hodnotách, to zase poukazuje na fakt, že toto měřidlo naopak vykazuje rychlosti proudění nižší, než je rychlost referenční. Zároveň lze z grafů vyčíst, že pro měřidlo *Flo-Mate 2000* relativní odchylka při vzrůstající rychlosti pojezdu klesá, stejně jako u měřidla *MF pro*. Hodnota relativních odchylek v převážné většině leží pod hranicí ± 2 %, což by se dalo vyhodnotit tak, že rychlost pojezdu nemá na vykazovanou rychlost měřidlem téměř žádný vliv.

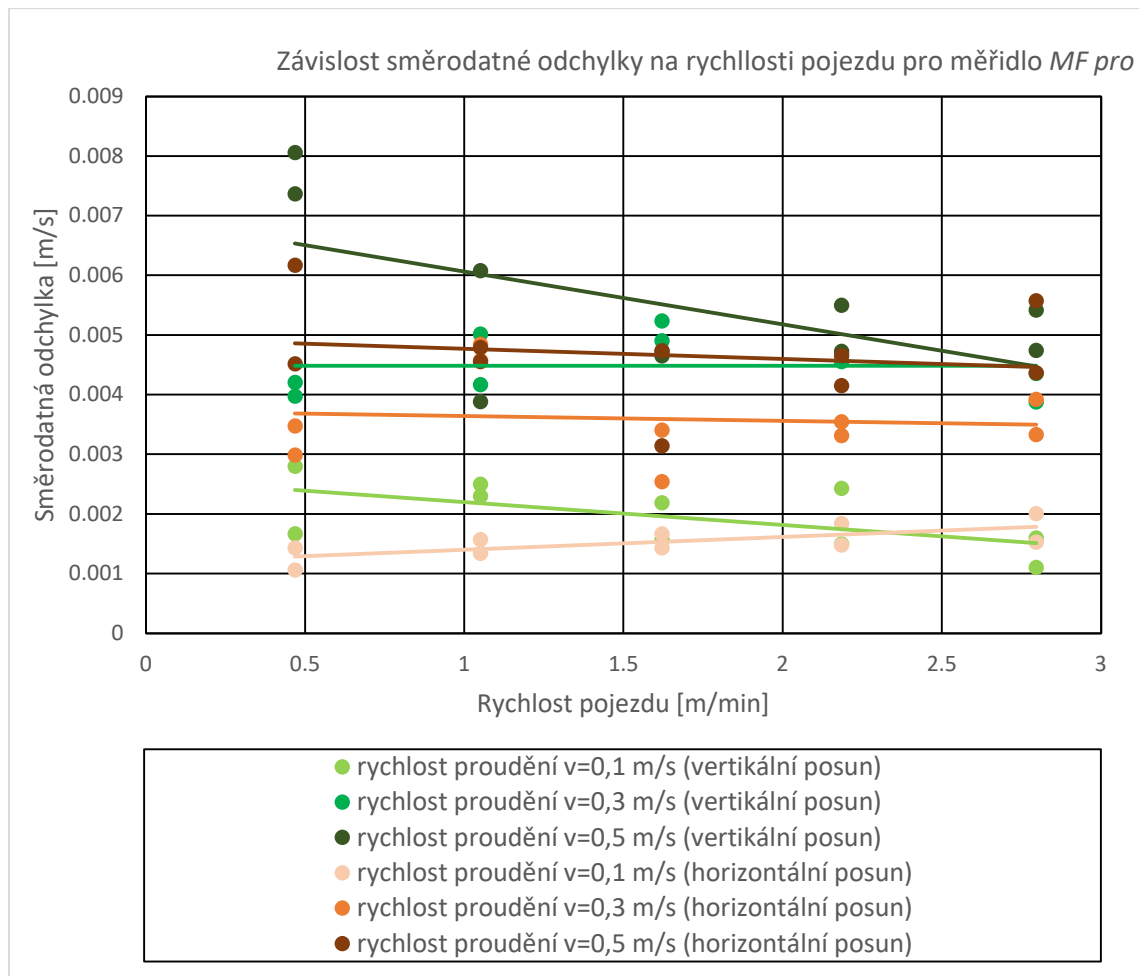
Jediný neobjasněný problém se vyskytl při měření rychlosti proudění měřidlem *MF pro* při rychlosti pojezdu 2,184 m/min, kdy došlo k většímu vychýlení relativní odchylky od referenční rychlosti měření.

7.6 VYHODNOCENÍ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY MĚŘENÍ

Jelikož jedním z cílů práce bylo vyhodnocení vlivu rychlosti posunu EMI měřidla na jím vykazovanou rychlost, bude v této kapitole blíže směrodatná odchylka měření pro obě měřidla. Směrodatná odchylka udává replikovatelnost měření, kdy se zkoumá do jaké míry je měřidlo stálé a tím pádem, jestli je možné měření opakovat nezávisle na sobě a dosahovat stejných výsledku. Pro obě měřidla jsou směrodatné odchylky vyhodnoceny zvlášť. Jednotlivé body v grafu, představující jednotlivá měření, jsou proloženy spojnici trendu.

7.6.1 Měřidlo *MF pro*

S tímto měřidlem byly provedeny dvě sady měření. Obě sady jsou zaneseny do jednoho grafu a jednotlivá měření (reprezentované body) jsou proloženy spojnici trendu, aby bylo možné snadno z grafu odečíst trend měření pro dané měřidlo.



Obr. 36) Graf znázorňující závislost směrodatné odchyly na rychlosti pojezdu pro měřidlo MF pro

Pro vertikální posun je z grafu na obr. 36 patrné, že se vzrůstající rychlostí proudění roste i velikost směrodatné odchyly. To znamená, že nejvyšších hodnot odchylyk je dosahováno při nejvyšší rychlosti proudění. Druhým trendem patrným z grafu je, že s rostoucí rychlostí pojezdu naopak velikost směrodatné odchylyk klesá. Tedy, že nejvyšší odchylyk nastávají při nejnižších rychlostech pojezdu. Zároveň se jednotlivé hodnoty směrodatné odchylyk pro jednotlivé rychlosti proudění výrazně neliší.

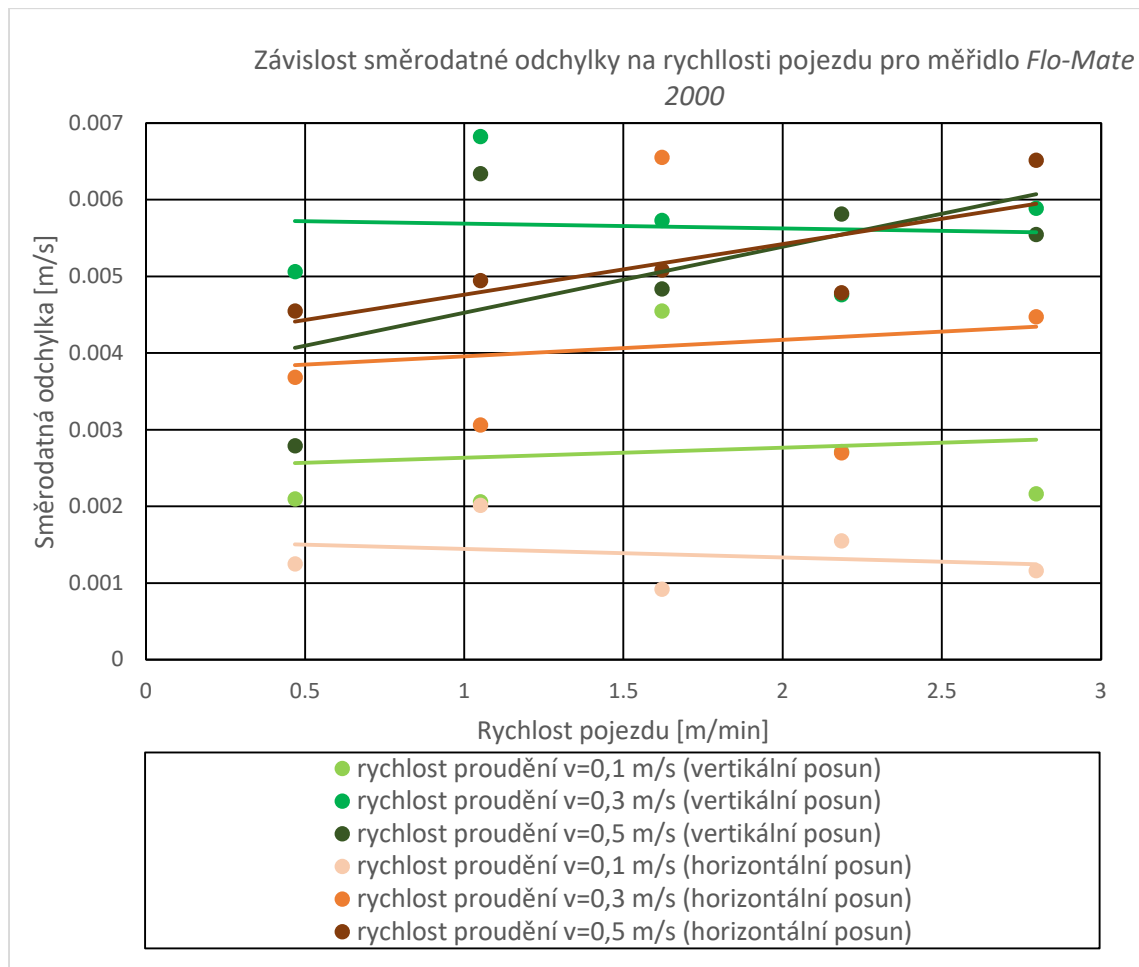
Jak již bylo zmíněno, směrodatná odchylyka nabývá nejnižších hodnot při nejnižší rychlosti proudění, a to od 0,00110 m/s do 0,00280 m/s. Naopak nejvyšších hodnot nabývá směrodatná odchylyka při nejvyšších rychlostech proudění, a to od 0,00388 m/s do 0,00806 m/s. Při rychlosti proudění $v=0,3$ m/s nabývá směrodatná odchylyka hodnot od 0,00388 m/s do 0,00523 m/s.

Pro horizontální posun jsou z grafu na obr. 36 patrné mírně jiné trendy. Směrodatné odchylyk nabývají menších hodnot, než tomu je u vertikálního posunu. Pro rychlosti

proudění $v=0,3$ m/s a $v=0,5$ m/s má velikost směrodatné odchylky klesající charakter, při rychlosti proudění $v=0,1$ m/s má velikost směrodatné odchylky rostoucí charakter. Zároveň stejně jako u vertikálního posunu nejsou jednotlivé hodnoty směrodatných odchylek pro jednotlivé rychlosti měření od sebe nijak výrazně odchýlené a nejvyšších hodnot nabývají při nejvyšší rychlosti proudění. Při rychlosti proudění $v=0,1$ m/s nabývá směrodatná odchylka hodnot od 0,00106 m/s do 0,00200 m/s. Jelikož při této rychlosti proudění vody má funkce směrodatné odchylky vzhledem ke zvyšující se rychlosti rostoucí trend, nejvyšších směrodatných odchylek je dosahováno při nejvyšší rychlosti pojezdu. Při rychlosti proudění $v=0,3$ m/s nabývá směrodatná odchylka hodnot od 0,00254 m/s do 0,00484 m/s. Nejvyšších hodnot směrodatná odchylka nabývá při rychlosti proudění $v=0,5$ m/s, a to od 0,00314 m/s do 0,00617 m/s. U posledních dvou zmíněných rychlostí proudění má směrodatná odchylka klesající charakter vzhledem k rychlosti posunu, tedy nejvyšších hodnot nabývá při nejnižší rychlosti proudění.

7.6.2 Měřidlo *Flo-mate 2000*

S měřidlem *Flo-Mate 2000* byla provedena pouze jedna sada měření. Stejně jako u měřidla *MF pro* je vyhodnocení směrodatné odchylky v závislosti na rychlosti posunu měřidla pro různé rychlosti proudění zanesena do grafu. Jednotlivé hodnoty směrodatné odchylky jsou proloženy spojnicí trendu.

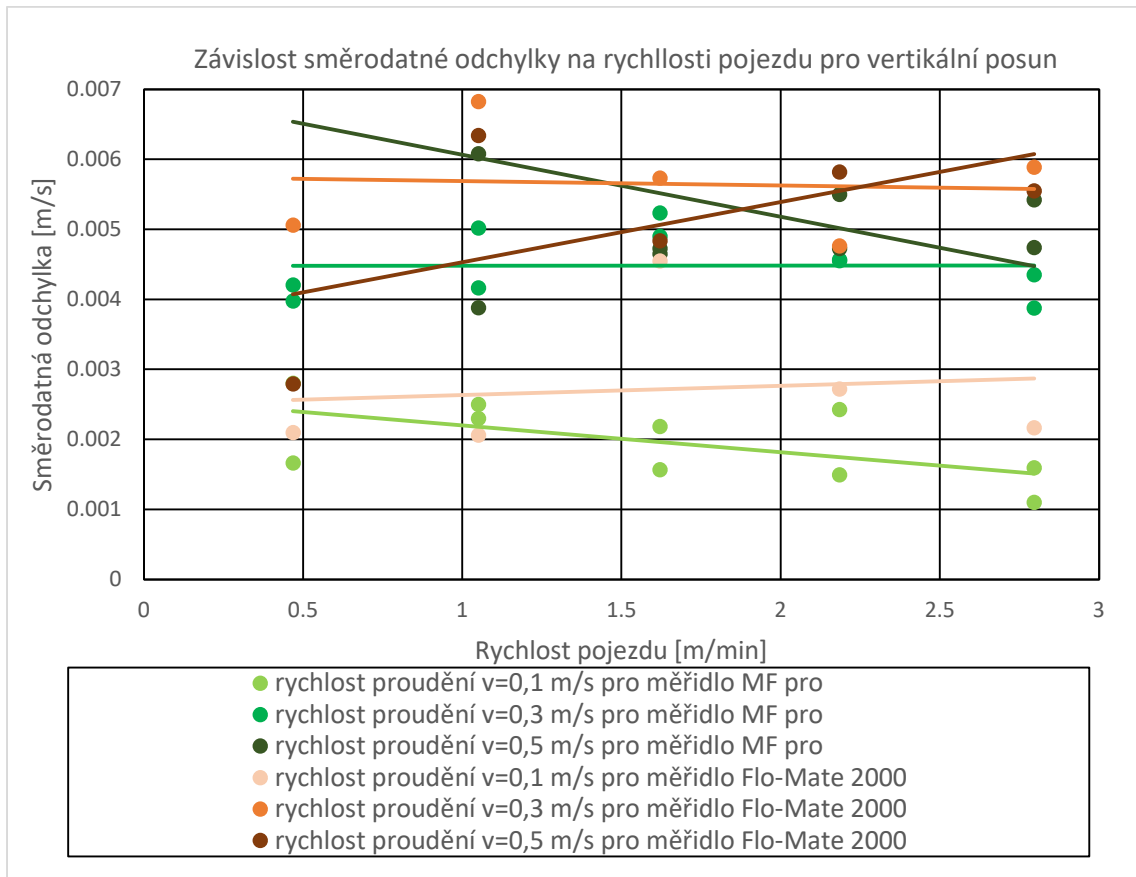


Obr. 37) Graf znázorňující závislost směrodatné odchytky na rychlosti pojezdu pro měřidlo *Flo-Mate 2000*

Jak je vidět v grafu na obr. 37, má směrodatná odchytka vzhledem k rostoucí rychlosti posunu při vertikálním pojezdu rostoucí charakter, pouze pro rychlost proudění $v=0,3$ m/s má klesající charakter. Zároveň ale i pro měřidlo *Flo-Mate 2000* platí, že směrodatná odchytka při vertikálním posunu nabývá nejmenších hodnot při nejnižší rychlosti proudění. Jednotlivé směrodatné odchytky při různých rychlostech proudění jsou od sebe více odchýleny, nejvýrazněji se od sebe navzájem liší směrodatné odchytky při rychlosti proudění $v=0,1$ m/s, kdy všechny směrodatné odchytky leží v rozmezí hodnot od 0.00206 m/s do 0.00272 m/s, kromě jediné- při rychlosti pojezdu 1,62 m/min, která je rovna 0.00455 m/s. Pro rychlost proudění $v=0,3$ m/s nabývá směrodatná odchytky hodnot v rozmezí od 0.00476 m/s do 0.00682 m/s. Při této rychlosti proudění je nevyšších hodnot směrodatné odchytky dosahováno při nejnižší rychlosti pojezdu. U rychlosti proudění $v=0,5$ m/s leží směrodatná odchytky v intervalu hodnot od 0.00279 m/s do 0.00634 m/s. Nejvyšších hodnot směrodatné odchytky je dosahováno při nejvyšší rychlosti pojezdu.

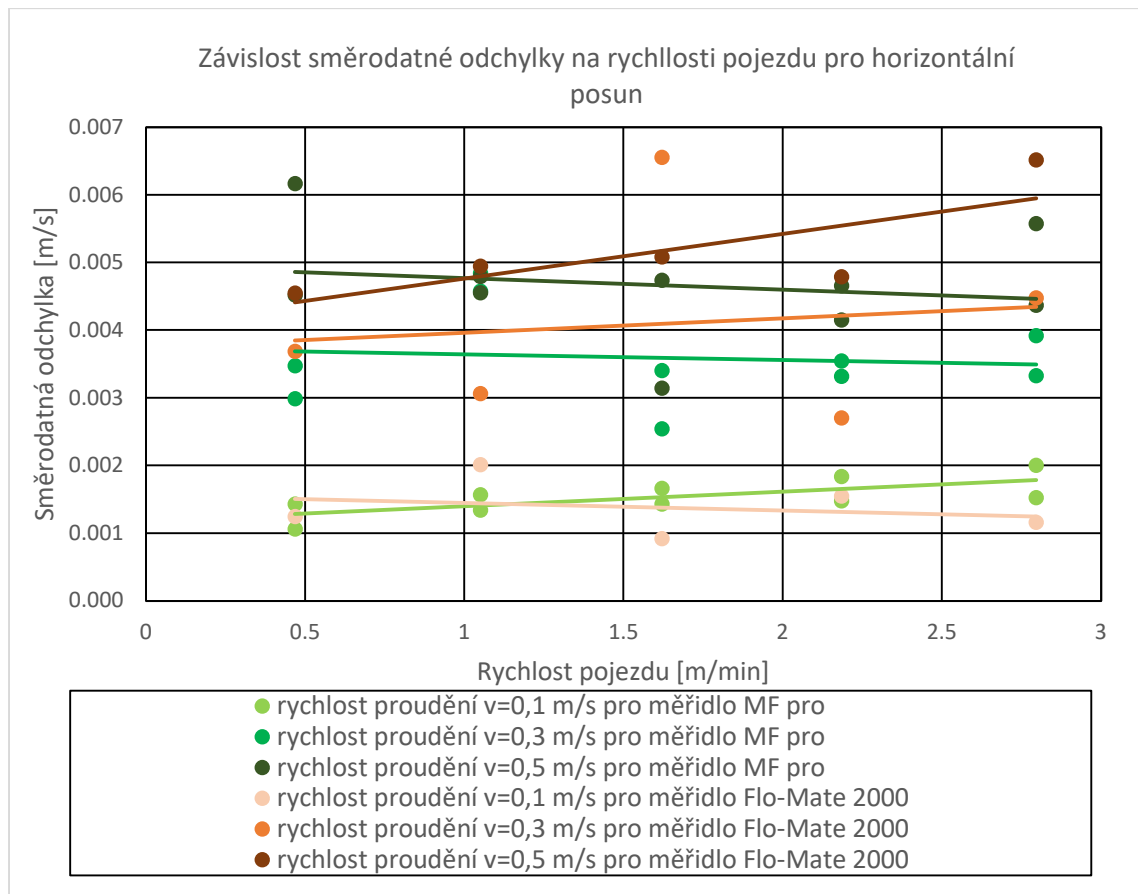
Platí, že směrodatná odchylka vzhledem ke zvyšující se rychlosti posunu při horizontálním pojezdu má rostoucí trend, až na směrodatnou odchylku pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s, která má klesající charakter. Zároveň stejně jako u vertikálního posunu jsou hodnoty směrodatné odchylky pro jednotlivé rychlosti proudění více odchýleny. Tentokrát je tento trend nejvíce patrný u rychlosti proudění $v=0,3$ m/s, kdy hodnoty směrodatné odchylky nabývají hodnot od 0.00270 m/s do 0.00447 m/s, pouze hodnota u rychlosti posunu 1,62 m/min nabývá hodnoty 0.00655 m/s, která je značně vyšší. Pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s jsou hodnoty směrodatné odchylky v rozmezí od 0.00092 m/s do 0.00201 m/s. Při této rychlosti proudění má směrodatná odchylka vzhledem k rychlosti posunu klesající charakter, tedy nevyšších hodnot nabývá při nejnižší rychlosti posunu. Při rychlosti $v=0,5$ m/s nabývá směrodatná odchylka hodnot od 0.00455 m/s do 0.00651 m/s. V tomto případě má naopak funkce směrodatné odchylky vzhledem k rychlosti posunu rostoucí charakter, tedy nejvyšších hodnot nabývá při nejvyšší rychlosti posunu.

7.6.3 Porovnání obou měřidel



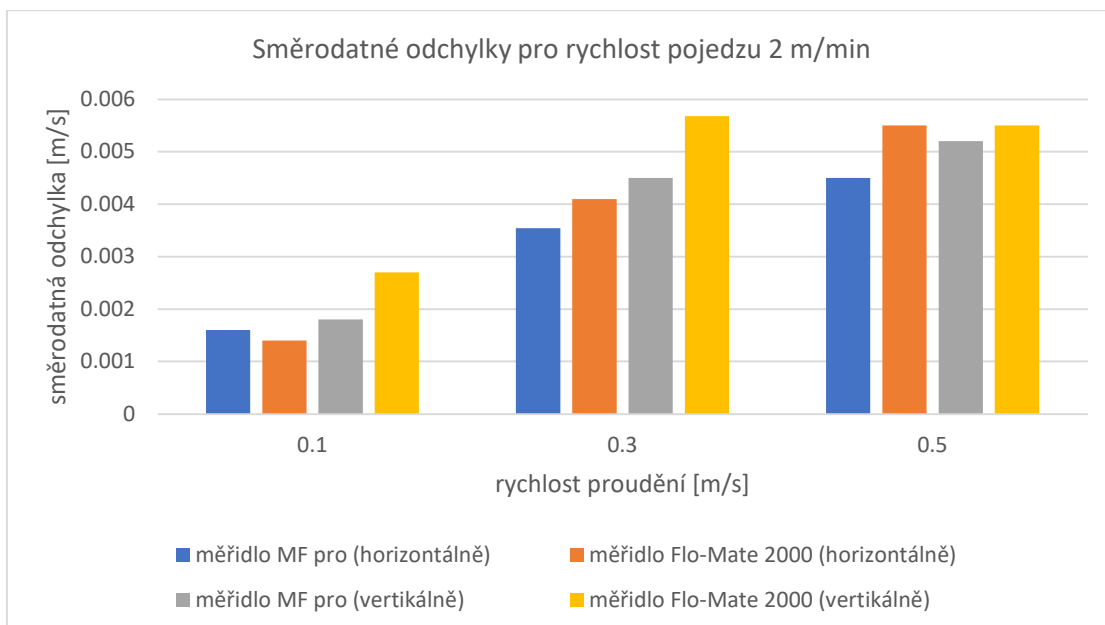
Obr. 38) Graf znázorňující závislost směrodatné odchyly na rychlosti pojezdu pro obě měřidla při vertikálním posunu

Z grafu na obr. 38 je patrné, že směrodatná odchyly u měřidla *MF pro* nabývá ve většině případů nižších hodnot, než je tomu u měřidla *Flo-Mate 2000*. Pro měřidlo *MF pro* platí, že všechny směrodatné odchyly mají vzhledem ke zvyšující se rychlosti posunu klesající trend, tedy že se vzrůstající rychlostí velikost směrodatné odchyly klesá. Toto neplatí pro měřidlo *Flo-Mate 2000*, u toho má směrodatná odchyly pro každou rychlost proudění jiný trend. U rychlosti proudění $v=0,1$ m/s směrodatná odchyly se vzrůstající rychlostí pojezdu roste, při rychlosti proudění $v=0,3$ m/s je téměř konstantní, při rychlosti proudění $v=0,5$ m/s naopak směrodatná odchyly se zvyšující se rychlostí pojezdu roste. Zároveň je patrné, že pro měřidlo *Flo-Mate 2000* jsou jednotlivé hodnoty směrodatné odchyly pro jednotlivé rychlosti proudění více odchýleny, u měřidla *MF pro* se navzájem od sebe zásadně neliší.



Obr. 39) Graf znázorňující závislost směrodatné odchyly na rychlosti pojezdu pro obě měřidla při horizontálním posunu

Z grafu na obr. 39 lze vidět, že odchyly pro měřidlo *MF pro*, stejně jako u vertikálního pojezdu, ve většině případů nabývají nižších hodnot oproti směrodatným odchyilkám měřidla *Flo-Mate 2000*. Zároveň lze pro obě měřidla konstatovat, že nejnižších hodnot směrodatná odchylyka nabývá při nejnižší rychlosti proudění. U měřidla *Flo-Mate 2000* je směrodatná odchylyka pro rychlosti proudění $v=0,3$ m/s a $v=0,5$ m/s rostoucí se zvyšující se rychlostí pojezdu, pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s je klesající. U měřidla *MF pro* je naopak jedinou směrodatnou odchyilkou s rostoucím charakterem směrodatná odchylyka pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s, směrodatné odchylyky pro rychlosti proudění $v=0,3$ m/s a $v=0,5$ m/s mají vzhledem ke zvyšující se rychlosti pojezdu klesající charakter.



Obr. 40) Graf směrodatné odchylky pro rychlost pojezdu 2 m/min

Z grafu na obr. 40 lze vidět porovnání směrodatných odchylek pro obě měřidla při rychlosti pojezdu 2 m/min. Je patrné, že měřidlo *Flo-Mate 2000* vykazuje ve všech případech kromě horizontálního pojezdu při současné rychlosti proudění $v=0,1$ m/s vyšší směrodatné odchylky než měřidlo MF pro. Z tohoto grafu je také jasně patrné, že se zvyšující se rychlostí proudění vody se zvyšuje velikost relativní odchylky.

8 ZÁVĚR

Cílem výzkumu provedeném v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební v Brně bylo prokázat vhodnost EMI měřidel pro jejich použití při plošné integrační metodě a stanovení vlivu rychlosti pojezdu EMI měřidla na jím vykazovanou rychlost, protože pro měření v profilech s volnou hladinou bylo podle MP 010 možné použít pouze vodoměrné vrtule. EMI měřidla na rozdíl od vodoměrných vrtulí mají několik výhod- dají se s nimi měřit větší rozsahy rychlostí než s vodoměrnými vrtulemi a zároveň se pro tyto rychlosti používá pouze jedno měřidlo (ne několik propelerů). Celé měření k této bakalářské práci bylo provedeno na žlabu o jmenovité šířce 1,0 m v budově B.

Na základě zpracování výsledků výzkumu byly vyvozeny následující závěry. Z rychlostí pojezdu se jako nejvhodnější jeví rychlost posunu $v = 2$ m/min, která je snadno realizovatelná i při ručním pohybu měřidlem. Tato rychlost byla vybrána na základě analýzy relativních odchylek, které měřidla vykazují, při této rychlosti totiž měřidla vykazují jedny z nejmenších relativních odchylek.

Dále bylo prokázáno, že se zvyšující se dobou měření, se zvyšuje i přesnost měření. V ideálním případě by měření mělo trvat alespoň 60 sekund. Je ale i tak nutné měření několikrát zopakovat. Zopakováním měření nezávisle na sobě dosahujeme co nejvyšší přesnosti měření a dochází k vyloučení náhodné chyby měření.

Z naměřených hodnot se ukázalo, že EMI měřidla jsou méně vhodná pro měření při rychlosti proudění $v = 0,1$ m/s, protože při takovéto rychlosti proudění je dosahováno nejvyšší relativní odchylky měření u obou měřidel, některé relativní odchylky dosahují hodnoty až 4 %. Stále ale vykazují při této rychlosti proudění lepší výsledky než vodoměrné vrtule. Při vyšších rychlostech proudění se relativní odchylka měření snižuje a její hodnoty se vyrovnávají.

Směrodatné odchylky se pohybují v řádu mm/s. Takovéto směrodatné odchylky mají na správnost výsledku jen minimální vliv. Zároveň velikost směrodatné odchylky se se změnou rychlosti posunu zásadně nemění.

Z naměřených hodnot lze usuzovat, že skupina EMI měřidel je vhodná pro měření v pravoúhlých prizmatických kanálech a zároveň je vhodná pro provádění úředního měření plošnou integrační metodou.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *METROLOGIE: VĚDECKÁ, LEGÁLNÍ, PRAKTICKÁ*. 29. 2/2020.
- [2] Metrologický předpis MP 010 – Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou – provádění úředního měření metodou rychlostního pole, objemovou metodou, vážicí metodou, přenosnou měřicí sestavou s průtokoměrem, měrnými přelivy a žlaby, Brno 3/2021
- [3] TUČANOVÁ, Kamila. *Metody měření průtoku vody v povrchových tocích*. Praha, 2021. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta.
- [4] *Odborný článek o měření průtoku* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html>
- [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 zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017
- [6] Žoužela, M., Šulc, J., Zubík, P.: Využití integrační metody rychlostního pole pro úřední měření průtoku v profilech s volnou hladinou. Program rozvoje metrologie 2022 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2022
- [7] SÝKORA, Lukáš. *Zhodnocení integrační metody pro stanovení průměrné rychlosti na svislici v prizmatických korytech*. Brno, 2003. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
- [8] UNČOVSKÝ, Ondřej. *Zhodnocení integrační metody pro stanovení průřezové rychlosti v prizmatických korytech*. 2004. Diplomová práce. FAST, VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
- [9] ČSN EN ISO 748: *Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech - Metody rychlostního pole s použitím bodových měření*. 2008.
- [10] OTT Hydromet GmbH: OTT – katalog výrobce. <http://www.ott.com>. [Online] 2017
- [11] MARSH McBIRNEY Inc.: MARSH McBIRNEY – katalog výrobce. www.marsh.mcbirney.com. [Online] 2017

- [12] Zákon elektromagnetické indukce. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon_elektromagnetick%C3%A9_indukce
- [13] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, o.s., 2008.
- [14] Normální rozdělení. In: *WikiSkripta* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD
- [15] Vodní hospodářství, 67. ročník, číslo 6/2017
- [16] *Volba nejlepší spojnice trendu pro vaše data* [online]. In: . [cit. 2023-03-31]. 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>
- [17] Charakteristiky variability (proměnlivosti souboru). In: *VFU* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn1/variabil.htm>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1- Závislost hustoty vody na její teplotě [2]</i>	<i>9</i>
<i>Tabulka 2- Počet svislic v závislosti na šířce toku [2]</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3- Přehled propelerů a podmínky jejich použití [2]</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 4- Nejistota ve stanovení šířky na hladině spolehlivosti 95 % [2]</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 5- Nejistota při měření hloubky pásu na hladině spolehlivosti 95 % [2]</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 6- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 10 sekund; platí i pro bezprostředně po sobě provedená měření s dobou měření 5 sekund [2]</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 7- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 15 sekund [2]</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 8- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 30 sekund [2]</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 9- Relativní nejistota ve stanovení bodové rychlosti v procentech na hladině spolehlivosti 95 % při době měření 60 sekund [2]</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 10- Relativní nejistota reprodukovatelnosti kalibračních konstant měřidla bodové rychlosti v % na hladině spolehlivosti 95 % [9]</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 11- Relativní nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici v % na hladině spolehlivosti 95 % při vyhodnocení grafickou metodou [2]</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 12- Relativní nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici v % na hladině spolehlivosti 95 % při vyhodnocení dle rovnic v kapitole 2.3.4. [2]</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 13- Relativní nejistota ve stanovení průřezové rychlosti v % na hladině spolehlivosti 95 % v závislosti na počtu svislic a použité metodě vyhodnocení [2]</i>	<i>44</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1) Měrné přelivy</i>	11
<i>Obr. 2) Venturiho (vlevo) a Parshallův (vpravo) žlab [4]</i>	11
<i>Obr. 3) Definiční schéma</i>	13
<i>Obr. 4) Příklad rozložení měrných bodů na svislici při měření rychlosti [6]</i>	Chyba!
Záložka není definována.	
<i>Obr. 5) Schéma posunu v horizontálním a vertikálním směru</i>	15
<i>Obr. 6) Typy plováků [3]</i>	17
<i>Obr. 7) Schéma měření rychlosti proudění pomocí plovákové metody s uvedením počátečního, středového a koncového profilu (jedná se o půdorysný pohled) [3]</i>	18
<i>Obr. 8) Vodoměrná vrtule propelerového typu 5 upevněná na soutyči [5][6]</i>	19
<i>Obr. 9) Princip měření rychlosti kapaliny snímačem EMI měřidla a uspořádání hlavice snímače [5][6]</i>	20
<i>Obr. 10) Měřicí sestava s měřidlem MF pro od firmy OTT hydrometr [6]</i>	22
<i>Obr. 11) Měřicí sestava s měřidlem Flo-mate 2000 od firmy MARSH McBirney [6]</i>	24
<i>Obr. 12) Příklad ultrazvukové 2D sondy [3]</i>	25
<i>Obr. 13) Princip integrace hloubky- rychlost [7]</i>	26
<i>Obr. 14) Princip metody integrace rychlostního pole [7]</i>	27
<i>Obr. 15) Princip metody svislicových pásů [7]</i>	28
<i>Obr. 16) Princip metody mezisvislicových pásů [7]</i>	28
<i>Obr. 17) Diagram příčin a následků pro variabilitu v systému měření [5][6]</i>	30
<i>Obr. 18) Schéma zdrojů nejistot měření pro způsob určení B [13]</i>	32
<i>Obr. 19) Křivka Gaussova normálního rozdělení [14]</i>	34
<i>Obr. 20) Znázornění směrodatné odchylky pro naměřené body</i>	35
<i>Obr. 21) Protiproudí pohled na hydraulický žlab v budově B</i>	47
<i>Obr. 22) Žlab pro říční modelování v budově B</i>	48

<i>Obr. 23) Přenosný počítač a vyhodnocovací jednotka měřidla MF pro</i>	50
<i>Obr. 24) Traverzační zařízení sloužící pro automatický a plynulý pohyb EMI měřidla instalované na žlabu 100</i>	51
<i>Obr. 25) Příklad obrazovky programu Integrace.....</i>	52
<i>Obr. 26) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody..</i>	54
<i>Obr. 27) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody.....</i>	55
<i>Obr. 28) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody..</i>	56
<i>Obr. 29) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při různých rychlostech proudění vody.....</i>	57
<i>Obr. 30) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,1$ m/s...</i>	58
<i>Obr. 31) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,3$ m/s...</i>	59
<i>Obr. 32) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti horizontálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,5$ m/s...</i>	60
<i>Obr. 33) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,1$ m/s</i>	61
<i>Obr. 34) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,3$ m/s</i>	61
<i>Obr. 35) Graf znázorňující závislost relativní odchylky měření rychlosti od referenční rychlosti na rychlosti vertikálního pojezdu při rychlosti proudění vody $v=0,5$ m/s</i>	62
<i>Obr. 36) Graf znázorňující závislost směrodatné odchylky na rychlosti pojezdu pro měřidlo MF pro.....</i>	64
<i>Obr. 37) Graf znázorňující závislost směrodatné odchylky na rychlosti pojezdu pro měřidlo Flo-Mate 2000.....</i>	66

<i>Obr. 38) Graf znázorňující závislost směrodatné odchytky na rychlosti pojezdu pro obě měřidla při vertikálním posunu.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 39) Graf znázorňující závislost směrodatné odchytky na rychlosti pojezdu pro obě měřidla při horizontálním posunu</i>	<i>69</i>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

V - zachycený objem [m^3]

t - čas [s]

\bar{Q} - hledaný průtok [m^3/s]

n - počet opakování

m - hmotnost zachycené vody [kg]

ρ - hustota vody [kg/m]

Q_{kor} - korigovaný průtok [m^3/s]

V_{kon} - objem, který během měření proteče koncem měřeného úseku [m^3]

V_{zac} - proteklý objem měřený na počátku měřeného úseku [m^3]

V_i - celkový naměřený objem [m^3]

Er - relativní chyba průtokoměru stanovená kalibrací, $Er=f(Q)$

H - hloubka proudu protiproudě před žlabem [m]

h - přepadová výška protiproudě před přelivem [m]

a, b, c, d - koeficienty definující příslušnou funkční závislost [-]

Q - hodnota průtoku [m^3/s]

b_i - šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu [m]

h_i - výška svislicového nebo mezisvislicového pásu [m]

v_i - průměrná rychlost na měrné svislici [m/s]

m - počet svislicových nebo mezisvislicových pásů

S - plocha průtočného profilu [m^2]

v - střední profilová rychlost [m/s]

$u_{0,2}$ - bodová rychlost měřená v 0,2 násobku výšky svislice, měřená ode dna [m/s]

$u_{0,4}$ - bodová rychlost měřená v 0,4 násobku výšky svislice, měřená ode dna [m/s]

$u_{0,6}$ - bodová rychlost měřená v 0,6 násobku výšky svislice, měřená ode dna [m/s]

$u_{0,8}$ - bodová rychlost měřená v 0,8 násobku výšky svislice, měřená ode dna [m/s]

u_d - bodová rychlost měřená co nejbliže dnu [m/s]

u_h - bodová rychlost měřená co nejbliže hladině [m/s]

B - šířka měrného profilu měřená v hladině [m]

α, β - kalibrační konstanty vodoměrné vrtule

s_{xi} - směrodatná odchylka výběrového průměru parametru X_j

$\frac{\partial y}{\partial x_j}$ - parciální derivace funkce Y podle parametru X_j

p_{AB} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení šířky profilu na hladině spolehlivosti 95 %

p_{Ah} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení hloubky pásu na hladině spolehlivosti 95 %

p_{Ac} - relativní nejistota stanovená způsobem A vystihující reprodukovatelnost kalibračních konstant měřidla rychlosti vodního proudu na hladině spolehlivosti 95 %

p_{Au} - relativní nejistota stanovená způsobem A ve stanovení bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95 %

N - počet opakování měření v měrném profilu

p_{BB} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení šířky měrného profilu na hladině spolehlivosti 95%

p_{Bh} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení hloubky proudu na hladině spolehlivosti 95%

p_{Bc} - relativní nejistota stanovená způsobem B ve stanovení kalibrační přímky (závislosti) měřidla rychlosti vodního proudu na hladině spolehlivosti 95%

p_{Bk} - relativní nejistota stanovená způsobem B pocházející ze způsobu stanovení opravného koeficientu integrační metody

p_{Bp} - relativní nejistota stanovená způsobem B pocházející ze způsobu posunu

z_{max} - maximální odchylka od nominální veličiny parametru X, u které je pravděpodobnost překročení jen velmi malá

ε - koeficient statistického rozdělení

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s (1.měření)

Příloha č. 2- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s (2.měření)

Příloha č. 3- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,3$ m/s (1.měření)

Příloha č. 4- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,3$ m/s (2.měření)

Příloha č. 5- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,5$ m/s (1.měření)

Příloha č. 6- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,5$ m/s (2.měření)

Příloha č. 7- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *Flo-Mate 2000* pro rychlost proudění $v=0,1$ m/s (1.měření)

Příloha č. 8- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *Flo-Mate 2000* pro rychlost proudění $v=0,3$ m/s (1.měření)

Příloha č. 9- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *Flo-Mate 2000* pro rychlost proudění $v=0,5$ m/s (1.měření)

Příloha č. 10- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *MF pro* pro rychlost proudění $v=0,0$ m/s

Příloha č. 11- Tabulka naměřených hodnot pro měřidlo *Flo-Mate 2000* pro rychlost proudění $v=0,0$ m/s

Příloha č. 12- Graf závislosti směrodatné odchylky na rychlosti posunu pro měřidlo *MF pro* při vertikálním pojezdu

Příloha č. 13- Graf závislosti směrodatné odchylky na rychlosti posunu pro měřidlo *MF pro* při horizontálním pojezdu

Příloha č. 14- Graf závislosti směrodatné odchylky na rychlosti posunu pro měřidlo *Flo-Mate 2000* při vertikálním pojezdu

Příloha č. 15- Graf závislosti směrodatné odchylky na rychlosti posunu pro měřidlo *Flo-Mate 2000* při horizontálním pojezdu