



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ČASOVÝ VÝVOJ METROLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK ULTRAZVUKOVÉHO MĚŘIDLA BODOVÝCH RYCHLOSTÍ

TIME EVOLUTION OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ULTRASONIC POINT VELOCITY
METER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Renata Khainová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodních staveb
Studentka: **Renata Khainová**
Vedoucí práce: **Ing. Michal Žoužela, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: B0732A260005 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:

Časový vývoj metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalář bude dlouhodobě sledovat vývoj změn metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí proudu. Měřidlo bude v pravidelných intervalech podrobovat zkouškám ve speciální trati laboratoře.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Analýza experimentálně získaných dat ve sledovaném období bude zaměřena na posouzení mezilehlé preciznosti a variability měřených rychlostí ultrazvukovým měřidlem.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] ČSN ISO EN 772. Hydrometrická měření – Terminologie. 2023
- [2] ČSN EN ISO 748. Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole s použitím bodových měření. 2001, 2008, 2022, 2023
- [3] Metrologický předpis MP 010 – Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou. Postup pro provádění úředního měření metodou rychlostního pole, objemovou metodou, vážicí metodou, přenosnou měřicí sestavou s průtokoměrem, měrnými přelivy a žlaby. Český metrologický institut. 02/2023
- [4] Němeček, P. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, o. s., 2008
- [5] FlowTracker2. User's manual. SonTek.ver. 1.7. 11/2019

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 6. 11. 2023

L. S.

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

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem časového vývoje metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí FlowTracker2. Experimentální část práce probíhala formou opakovaných měřicích cyklů v předem stanovených časových intervalech. Získaná data z měření byla zaznamenávána do vytvořených formulářů a následně vyhodnocena. Výsledky byly prezentovány v podobě grafů a tabulek, které umožňují sledovat časový vývoj metrologických charakteristik. Práce se zaměřuje na sledování stability při nízkých hodnotách rychlosti a na metrologické vlastnosti a analýzu dlouhodobé stability měření při vybraných rychlostech. Výsledky práce by měly přispět k hlubšímu pochopení vlivu časových faktorů na metrologické vlastnosti ultrazvukového měřidla bodových rychlostí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření bodové rychlosti, ultrazvukové měřidlo, FlowTracker2, mezilehlá preciznost, nejistota měření

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the study of the time evolution of the metrological characteristics of the ultrasonic point velocity meter FlowTracker2. The experimental work consisted in regular measurement cycles during a defined time interval. The obtained values from the measurements were recorded in the created forms and subsequently evaluated. The results were presented in the form of graphs and tables, which allow to follow the time evolution of the metrological characteristics. The work focuses on the monitoring of stability at low speed values and on the metrological characteristics and analysis of long-term stability of measurements at selected speeds. The results of the work should contribute to a deeper understanding of the influence of temporal factors on the metrological characteristics of ultrasonic point velocity meters.

KEYWORDS

Point velocity measurement, ultrasonic gauges, FlowTracker2, intermediate precision, measurement uncertainty

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KHAINOVÁ, Renata. *Časový vývoj metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Časový vývoj metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2024

Renata Khainová
autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Časový vývoj metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2024

Renata Khainová
Autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalovi Žouželovi, Ph.D. za poskytnuté rady, cenné připomínky, vstřícný přístup a za odbornou pomoc při experimentálním měření na zkušební trati. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jiřímu Hlaváčkovi ze společnosti AQUAMONITORING, s.r.o., za zapůjčení měřidla Flowtracker2 pro účely experimentálních prací v rámci mé bakalářské práce.

OBSAH

1	Úvod	9
2	Metody jednorázového měření průtoku kapalin v profilech s volnou hladinou	10
2.1	Terminologie	10
2.2	Přehled metod terénního měření průtoku	11
2.3	Úřední měření	13
2.3.1	Metody úředního měření aplikované v oblasti vodního hospodářství.....	13
2.4	Metoda rychlostního pole	15
2.4.1	Princip metody	16
2.4.2	Přehled měřidel pro stanovení bodové rychlosti proudění vody	16
2.5	UZV měřidla z pohledu ČSN, EN a ISO norem	18
2.6	UZV měřidla typu ADV	19
3	Motivace práce	26
4	Popis experimentálních prací	27
4.1	Použité ADV měřidlo	27
4.2	Zkušební trať měřidel bodových rychlostí	27
4.3	Ostatní měřidla a pomocná zařízení	28
4.4	Postup měření a vyhodnocení	28
5	Výsledky experimentálního výzkumu	36
5.1	Mezilehlá preciznost měření vykazované rychlosti.....	36
5.2	Časová variabilita vykazovaných rychlostí	42
5.3	Dlouhodobá stabilita nízkých rychlostí	44
6	Doporučení k dalším experimentálním pracím	46
7	Závěr	47
8	Použité informační zdroje	48
9	Seznam obrázků a grafů	51
10	Seznam příloh	52

1 ÚVOD

V oblasti vodního hospodářství a hraje hydrometrie klíčovou roli. Zahrnuje soubor metod a technik sloužících k měření a hodnocení např. řek, potoků, stokových sítí, přivaděčů k vodním elektrárnám. Jedním z nejdůležitějších parametrů v hydrometrii je průtok, definovaný jako objem vody, který proteče průřezem v daném časovém intervalu.

Existuje mnoho metod pro měření průtoku vody, z nichž každá má své specifické vlastnosti a aplikační oblasti. Jednou z možností stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou je tzv. metoda rychlostního pole s využitím měřidel pro stanovení bodové rychlosti.

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem časového vývoje metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí FlowTracker2. Konkrétně se práce zaměří na analýzu mezilehlé preciznosti měření vykazované rychlosti, časovou variabilitu vykazovaných rychlostí a na dlouhodobou stabilitu měření při nízkých rychlostech

Práce je rozdělena do několika kapitol, problematika bude postupně přibližována v teoretické rovině, následně přijdou kapitoly věnující se experimentální části.

Druhá kapitola práce se věnuje teoretickým poznatkům, je zde vysvětleno několik odborných termínů souvisejících s problematikou, dále je zde stručný popis metod terénního měření průtoku, vysvětlení problematiky úředního měření a následuje popis metody rychlostního pole a výčet několika měřidel bodových rychlostí, které na principu metody rychlostního pole pracují, důraz je kladen na detailnější popis přístroje Flowtracker2, se kterým jsem pracovala během experimentálních prací.

Ve třetí kapitole je objasněna motivace ke zpracování této práce, která pramení z nedostatku komplexního pochopení vlivu časových faktorů na metrologické vlastnosti ultrazvukových měřidel bodových rychlostí. Cílem práce je analyzovat časový vývoj metrologických charakteristik ultrazvukového měřidla bodových rychlostí v laboratorních podmínkách

Následující kapitoly práce se věnují experimentálním pracím, které probíhaly na zkušební trati v Laboratoři vodohospodářského výzkumu na Fakultě stavební VUT v Brně, kde během definovaného časového intervalu proběhlo několik pravidelných měřicích cyklů. Popis této laboratoře a průběh měřicích cyklů čtenář nalezne ve čtvrté kapitole. Naměřená data z ultrazvukového měřidla FlowTracker2 byla zaznamenána a následně zpracována. Vývoj metrologických charakteristik je po zpracování naměřených dat vizualizován v grafech, které jsou popsány a vyhodnoceny v páté kapitole, grafy jsou mimo jiné doloženy i jako přílohy této bakalářské práce. V šesté kapitole je zmíněno několik doporučení pro další experimentální práce s tímto měřidlem.

2 METODY JEDNORÁZOVÉHO MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

Tato kapitola se věnuje popisu základních metod jednorázového měření průtoku v profilech s volnou hladinou. Začátek kapitoly obsahuje výpis základních terminologických pojmů z oblasti měření průtoku. Následuje popis tzv. úředního měření a detailnější popis metod, které se při úředním měření pro stanovení průtoku používají. Dále je v kapitole popsán princip metody rychlostního pole a její využití v hydrometrii. Závěr této kapitoly je věnován ultrazvukovým (UZV) průtokoměrům, je zde uveden přehled norem, které se těmto přístrojům věnují, následuje popis několika UZV měřidel dostupných na trhu.

2.1 TERMINOLOGIE

Níže zmíněné termíny i jejich definice jsou převzaty z normy ČSN EN ISO 772 Hydrometrická měření – Terminologie [1]. Norma obsahuje termíny a jejich definice, které se používají v oblasti hydrometrických měření.

- **Bodová rychlost** – rychlost proudu v bodě v určeném směru.
- **Průtok** – objem kapaliny protékající průtočným profilem za jednotku času. Tento termín není synonymem pro proudění.
- **Měření** – soubor činností, jejichž cílem je stanovit hodnotu veličiny.
- **Měření průtoku** – proces měření průtoku kapaliny
- **Otevřené koryto** – **podélná** mezní plocha tvořená dnem a břehy nebo svahy, která vymezuje prostor pro proudící kapalinu s volnou hladinou.
- **Metoda rychlostního pole** – metoda stanovení průtoku, který se odvodí z plochy průtočného profilu, ohraničeného omočeným obvodem a volnou hladinou, a z integrace složek rychlostí v tomto průtočném profilu.
- **Ultrazvukový měřič rychlosti proudění, akustický měřič rychlosti proudění** – systém, který analyzuje přenos UZV impulzů ve vodě a tím umožňuje určení rychlosti.
- **Senzor, čidlo, snímač** – zařízení, které reaguje na fyzický nebo chemický podnět
- **Impulz** – řízené krátkodobé zvýšení nebo snížení přenášené energie
- **Průtokoměr** – zařízení, které měří průtok kapalin.
- **Indukční měřič rychlosti proudění (EMI-měřidlo)** – hydrometrický přístroj, který generuje magnetické pole kolmé ke směru proudění kapaliny a tím umožňuje odvození rychlosti z indukované elektromotorické síly vyvolané pohybem vodivé kapaliny v magnetickém poli.
- **Akustický měřič rychlosti proudění (ADV)** - třída přístrojů, které používají princip Dopplerova jevu pro výpočet rychlosti vody. Tyto přístroje jsou obvykle umístěny v pevném bodě v průtočném profilu a používají se ke zjištění bodové rychlosti pro výpočet průměrné rychlosti v tomto průtočném profilu.

- **Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem** – zařízení opatřené rotačním prvkem, jehož rychlost otáčení je závislá na rychlosti proudící kapaliny, ve které je umístěn.
- **Akustický průtokoměr (ADCP)** – přístroj, který pro výpočet rychlosti vody a průtoku používá akustický princip Dopplerova jevu.
- **Dopplerův jev** – (u akustických přístrojů využívajících Dopplerova jevu) rozdíl nebo posun frekvence vysílaných zvukových vln a frekvence přijímaných zvukových vln, které se odrážejí od pohybujících se částic ve vodě.
- **Výsledek měření** – hodnota získaná měřením přisouzená měřené veličině.
- **Chyba měření** – výsledek měření minus skutečná hodnota měřené veličiny.

2.2 PŘEHLED METOD TERÉNNÍHO MĚŘENÍ PRŮTOKU

V následující kapitole jsou uvedeny metody měření průtoku, které se nejčastěji používají při jednorázovém měření v profilech s volnou hladinou.

Objemová metoda

Objemová metoda měření průtoku je založena na principu odměřování objemu protékající kapaliny v daném časovém intervalu. Princip metody lze popsat jednoduchou rovnicí $Q = V/t$, kde V je objem protéklý za čas t . Jedná se o jednoduchou a přesnou metodu, která se používá pro měření průtoků v široké škále aplikací, od malých laboratorních experimentů až po průmyslové měření velkých průtoků. [2]

Vážicí metoda

Princip vážicí metody spočívá v tom, že měření průtoku je prováděno vážením nádrže nebo nádoby, do které je kapalina zachycena. Pro tento účel je potřeba přesná váha, která je schopna měřit změny hmotnosti nádrže během určitého časového intervalu. Více o této metodě je popsáno v kap.2.3.

Metoda rychlostního pole

Měření průtoku pomocí metod rychlostního pole může být provedeno pomocí vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem, elektromagnetických indukčních měřidel (EMI), akustických Dopplerových měřičů nebo pomocí ultrazvukových průtokoměrů založených na Dopplerově jevu, dále označovány jako ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). U těchto metod terénního měření průtoku je více způsobů, jak mohou být realizovány, jako např. brodění se vodním tokem, instalací měřidla na nosnou tyč, měřidlo může být taktéž zavěšeno z mostu, lanovky či stacionárního plavidla. V případě, kdy velmi turbulentní proudění, či přítomnost unášených částic znemožňuje použití výše uvedených měřidel může být alternativně použito měření pomocí plováků.[3]

Měrné přelivy a žlaby

Měření průtoku měrnými přelivy a žlaby je jednou z metod používaných k určení průtoku vody v otevřených vodních tocích, jako jsou řeky, potoky, kanály a odvodňovací systémy. Princip měření průtoků pomocí měrných přelivů a žlabů spočívá v použití konstrukce, která umožňuje měřit průtok kapaliny přes daný profil nebo přesně určenou část vodního toku. Tato metoda je relativně jednoduchá na použití a poskytuje spolehlivé výsledky při dodržení správných postupů a metodiky měření viz kap.2.3.

Laserová Dopplerovská anemometrie

Zkráceně LDA (Laser Doppler Anemometer), je moderní a velmi přesná metoda využívající laserové světlo k měření rychlosti proudění kapalin. Funguje na principu Dopplerova jevu. Profesionální zařízení LDA díky propracované elektronice umožňují měřit okamžité lokální i časově průměrné rychlosti proudění, včetně turbulence. Tato metoda ovšem vyžaduje zkušenou obsluhu. Pořizovací a provozní náklady jsou vyšší než u ostatních uvedených metod. [4]

Přenosná souprava s průtokoměrem

Ke stanovení průtoku je použit průtokoměr instalovaný v přenosné měřicí sestavě. Průtok je stanoven za ustáleného proudění v sestavě z rozdílu vykazovaných hodnot o proteklém objemu na konci a na začátku měření.

Kombinace výše uvedených metod

Vyjma Laserové Dopplerovské anemometrie, je možné použít všechny výše zmíněné metody k provádění tzv. úředního měření. Této problematice se bude věnovat následující kapitola.

2.3 ÚŘEDNÍ MĚŘENÍ

Úředním měřením je podle § 21 zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů, metrologický výkon, o jehož výsledku vydává subjekt autorizovaný Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví doklad, který má charakter veřejné listiny. [5]

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) může ve smyslu zákona autorizovat subjekt na jeho vlastní žádost k výkonu úředního měření ve stanoveném oboru měření po prověření úrovně jeho technického a metrologického vybavení. Jedním z oborů může být i měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou. [6]

K výkonu úředního měření je zapotřebí splnění následujících podmínek:

- používání měřidel, jež mají zajištěnou metrologickou návaznost (platnou kalibraci);
- zaměstnanec autorizovaného subjektu vlastní certifikát odborné způsobilosti úředního měřiče vydaný akreditovanou osobou nebo osvědčení o odborné způsobilosti vydané ÚNMZ.

2.3.1 METODY ÚŘEDNÍHO MĚŘENÍ APLIKOVANÉ V OBLASTI VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ

Autorizovaný subjekt se při provádění úředního měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou řídí platným metrologickým předpisem. V tomto konkrétním případě se jedná o Metrologický předpis MP 010 [5], který mimo jiné definuje postupy pro provádění měření následujícími metodami:

Metoda rychlostního pole, postup pro měření je určen primárně dle ČSN EN ISO 748.

Použitelnost této metody je omezena měřicím rozsahem rychlostí použitých měřidel bodové rychlosti. Požadavky na měrný profil a princip bodové metody rychlostního pole jsou zmíněny v kap. 2.4.

U metody rychlostního pole jsou používána tato měřidla: vodoměrná vrtule propelerového typu v souladu s ČSN ISO 2537 a čítač otáček propeleru vodoměrné vrtule, nebo souprava EMI měřidla se snímačem, datovým kabelem a vyhodnocovací jednotkou. Uvedená měřidla slouží k měření bodové rychlosti proudu. Další veličiny, které je třeba určit je úroveň vodní hladiny (např pomocí ocelového měřítka, sondovací tyče, hrotového nebo hákového měřidla) a ostatní délkové rozměry (s využitím např. ocelového, hrotového, nebo výsuvného měřítka, měřicí ocelové pásmo, nivelační lať, vodováha, nivelační přístroj nebo rotační laser). Pro funkčnost použité metody v případě použití EMI měřidel je zapotřebí, aby kapalina měla dostatečnou měrnou vodivost, ke stanovení měrné vodivosti slouží konduktometr.

Objemová metoda (jímání vody do odměrné nádoby), postup metodicky vychází z ČSN EN ISO 8316.

Průtok Q je roven poměru mezi zachyceným objemem V a odpovídajícím časem t .

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.3.1)$$

Pro stanovení objemu určuje MP010 možná měřidla:

- odměrná etanolová skleněná nádoba (rozsah měření 2; 5; 10; 20 dm³)
- odměrný skleněný válec (5,10; 20 dm³)
- odměrná tvarově stálá nádoba (má největší měřicí rozsah, (5-50) dm³)

Pro změření času se použijí stopky. Před samotným měřením je třeba smočit povrch použité nádoby, jeden pracovník e nádobu drží a zachytává do ní vodu a dává pokyny ke startu a konci měření, druhý pracovník měří dobu plnění a zapíše výsledky. Měření proběhne minimálně třikrát.

Vážicí metoda (jímání vody do vážicího vaku), postup měření metodicky vychází z ČSN EN 24185+AC.

Průtok je roven poměru mezi zachyceným objemem V a odpovídající dobou plnění t . Objem stanovíme jako podíl zachycené hmotnosti a hustoty (přesná hodnota hustoty čisté vody se odečte z tabulky ČSN EN 24185+AC podle aktuální naměřené teploty).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{m}{\rho \cdot t} \quad (2.3.2)$$

Měření, stejně jako u objemové metody, provádí 2 pracovníci, opět se provede smočení měřicí nádoby (vážicího vaku). Je nutné zapsat hmotnost samotného smočeného vaku, která se od finální hmotnosti odečte. První pracovník drží vak a dává pokyny ke startu a konci měření, druhý pracovník měří čas a zapisuje naměřené výsledky. Měření proběhne minimálně třikrát.

Nejvhodnější nádobou pro tuto metodu je vážicí vak, hodnota nominálního objemu je obvykle do 60 dm³, vak je z nepropustné látky a standardně má válcový tvar. Při této metodě je třeba změřit hmotnost m , čas t a teplotu T . Ke změření hmotnosti se využívá váha s obvyklým měřicím rozsahem 0,02 – 100 kg, pro změření času stopky a teplota je stanovena digitálním či skleněným teploměrem.

Metoda využívající přenosné měřicí sestavy s průtokoměrem, postup pro měření v MP 010 vychází z ČSN EN ISO 20456.

Tato metoda je založena na principu, kdy pomocí čerpadla napojeného hadicí na měřicí sestavu, jejíž součástí je průtokoměr pro měření v tlakových systémech, je do měrného profilu uměle čerpán stabilizovaný průtok o známé hodnotě.[6]

Pokud je touto metodou měřen průtok menší než 40 l/s, je přenosná sestava s průtokoměrem napojena na čerpadlo (pomocí hadic). Podmínkou pro použití je, aby mezi měrným profilem a výtokem ze sestavy nebyl žádný jiný přítok. Pokud průtokoměr funguje na bázi vodivosti vody, minimální hodnota měrné vodivosti vody je 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Je potřeba, aby voda, která se dostane do měřicí sestavy, byla mechanicky předčištěná, tzn. nesmí obsahovat větší množství pevných částic. Teplota měřené vody je v rozmezí 0,1 °C až 30 °C. Během měření musí být v nádrži dostatečné množství vody, je potřeba, aby bylo čerpadlo celé ponořené ve vodě, hladina by měla zachovat konstantní výšku.

Měřené veličiny jsou průtok Q , čas t a měrná vodivost σ . Pro zjištění průtoku slouží průtokoměr splňující ČSN EN ISO 4064-1 instalovaný v přenosné měřicí sestavě. Přednostně se instalují průtokoměry využívající energii ve formě ultrazvukového nebo elektromagnetického vlnění, může být instalován i jakýkoliv jiný průtokoměr splňující požadavky výše zmíněné ČSN. Průtokoměr musí být do přenosné sestavy instalován tak, aby byl při měření jeho měřicí prostor zcela zaplněn vodou. Pokud je použit indukční průtokoměr, je nutné zajistit elektrické spojení měřidla a vody. Čas t bude změřen stopkami a měrná vodivost σ konduktometrem.

Metoda využívající měrné přelivy a žlaby, postup pro měření v MP 010 vychází z ČSN ISO 1438 A ČSN ISO 9826, TNV 25 9305 [5]

Princip metody spočívá v možnosti stanovení jednoznačné funkční závislosti průtoku Q na úrovni vzduté hladiny h (tzv. Q/h charakteristiky) u vzdouvacích objektů. Přelivy a žlaby jsou instalovány do měrných profilů pro časově omezené měření průtoků.

Stanovení průtoku je u této metody možné pomocí několika měrných objektů. Rozdělujeme měrné objekty typu přeliv s výřezem (výřez trojúhelníkový, pravouhlý, lichoběžníkový, složený) a měrné objekty typu žlab (Parshall, PARS, Venturi). Měrné (vzdouvací) objekty musí být vyrobeny z materiálu zajišťujícího jejich pevnost, tvarovou stálost, nepropustnost a odolnost proti korozi. Dle požadavků na vzdouvací objekt v MP101 musí vzdouvací objekt odolat extrémním průtokům např. při přívalových srážkách a povodních. Úroveň vodní hladiny se potom měří ocelovým měřítkem, sondovací tyčí, hákovým nebo hrotovým měřidlem, alternativou mohou být kontaktní nebo bezkontaktní snímače všech druhů pro kontinuální záznam měřené veličiny.

2.4 METODA RYCHLOSTNÍHO POLE

Pro měření průtoku pomocí metody rychlostního pole můžeme využít několik měřidel. Metoda rychlostního pole spočívá ve stanovení průtoku na základě znalosti plochy průtočného průřezu a průřezové rychlosti. Stanovení plochy průřezu vychází ze stanovení úrovně hladiny a ze změření rozměrů profilu, stanovení průřezové rychlosti je poté možné uskutečnit několika způsoby. Vzhledem k tomu, že se tato práce bude věnovat měřidlu, které pracuje s bodovou rychlostí, bude se dále uvažovat pouze princip metody rychlostního pole s využitím měřidel pro stanovení bodové rychlosti.

2.4.1 PRINCIP METODY

Metoda pracuje na principu integrace funkce rychlostního pole přes průtočnou plochu. (2.3) Funkce se stanoví z aproximace změřených bodových rychlostí, následně je funkce integrována nejprve zpravidla po výšce měrného profilu, získáme takzvané průměrné rychlosti na svislici. U průměrných svislicových rychlostí je opět provedena aproximace a následná integrace, tentokrát po šířce profilu. Výsledkem tohoto postupu je získání hodnoty průtoku.

$$Q = \int_S f(u_i) dS \quad (2.3)$$

K měření bodových rychlostí je možné využít vodoměrné vrtule s rotačním prvkem, EMI měřidla, nebo ADV měřidla. Pro úřední měření průtoků touto metodou lze dle MP 010 použít pouze vodoměrné vrtule, či soupravu EMI měřidla. [3] [7]

2.4.2 PŘEHLED MĚRIDEL PRO STANOVENÍ BODOVÉ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VODY

Tato práce je věnována měřidlu, jež stanovuje průtok na základě měření bodové rychlosti na UZV principu (ADV), těmto měřidlům se věnuje detailně kapitola 2.4.4. Existují také ostatní měřidla, která ke stanovení průtoku využívají bodovou rychlost, jedná se o vodoměrné vrtule a EMI měřidla.

Nejstarším používaným měřidlem je **vodoměrná vrtule** propelerového typu (obrázek 2.4.1), která se často využívá pro stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou, ale taktéž při měření v tlakových systémech. Měření spočívá v zaznamenávání počtu otáček propeleru vodoměrné vrtule za určitou dobu. Výsledná rychlost je následně funkcí frekvence otáčení propeleru. Vodoměrné vrtule fungují dobře v čisté vodě. Ulpívání a namotávání částic z odpadní vody na vrtuli zkresluje měření, případně ho znemožňuje.

Další možností pro měření bodové rychlosti vodního proudu je **EMI měřidlo** (obrázek 2.4.2). Funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy se na vodiči v magnetickém poli indukuje napětí úměrné jeho rychlosti. Měřicí snímač má cívku vytvářející magnetické pole a elektrody pro měření indukovaného napětí. Napětí se elektronicky zpracuje a zobrazí jako rychlost. Velikost snímače odpovídá vodoměrné vrtuli. Pro správnou funkci je nutná minimální měrná vodivost kapaliny 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Obrázek 2.4.1 Vodoměrná vrtule propelerového typu [22]



Obrázek 2.4.2 Vyhodnocovací jednotka (vlevo) a sonda (vpravo) EMI měřidla [21]

2.5 UZV MĚŘIDLA Z POHLEDU ČSN, EN A ISO NOREM

ČSN EN ISO 748 Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole s použitím měření bodové rychlosti

Ve starší verzi ČSN EN ISO 748 není o UZV měřicích žádná informace, v nové verzi ČSN EN ISO 748 (český překlad 6.2023) jsou stanoveny metody pro určení rychlosti vody proudící v otevřených korytech a mimo metod používajících vodoměrné vrtule a plováky jsou zde již zařazeny a metody používající ADV.

Norma konstatuje, že postupy měření u ADV měřidel jsou prakticky stejné jako u vodoměrných vrtulí a EMI měřidel. Výběr místa, podmínky pro měření, způsob měření, stanovení plochy průtočného průřezu a způsob stanovení průtoku je při užití těchto měřidel shodný.

Rozdílem mezi těmito měřidly je specifikovaná minimální hloubka proudu, kdy u vodoměrných vrtulí a EMI měřidel je tato minimální požadovaná hloubka stanovena, u ADV měřidel není minimální hloubka proudu nijak definována. ADV lze tedy použít pro měření ve velmi mělkých vodách, pokud jsou vysílač i přijímač zcela ponořeny pod vodou. [7]

V příloze A této normy je popis akustických měřičů rychlosti založených na Dopplerově jevu (ADV), je zde popsán princip vysílání a přijímání odraženého signálu senzory; je zde informace o tom, že ADV stanovují rychlost proudění vody měřením změny frekvence a je zde informace o schopnosti měřidel pracovat v mělkých vodách při nízkých rychlostech.

V příloze E je informace o měření rychlosti akustickými přístroji v zimních podmínkách, měření lze provádět spuštěním přístroje do otvoru vyvrtaného v ledové pokrývce. Měření by se mělo provádět rychle, jelikož se po vynoření přístroje může na senzorech vytvořit silná vrstva ledu, která by mohla způsobit komplikace, v příloze E je dále informace o náchylnosti životnosti baterií k příliš nízkým teplotám [7]

ČSN EN ISO 18365 Hydrometrie – Výběr, zřízení a provoz vodoměrných stanic

Norma se týká spíše trvale instalovaných měřicích systémů. V kapitole 6 je informace o tom, že použití ADV průtokoměrů je jedna z možností měření průtoku ve vodoměrných a průtokoměrných stanicích, v kapitole 8 je informace o tom, že ADV využívají techniky měření rychlosti, a tak odhadují průtok, tato technika vychází z Dopplerova posuvu, který popisuje rozdíl nebo posun frekvence zvukových vln v případě, že jsou odraženy pohybujícím

se tělesem, popis senzorů a princip kterým vysílají a přijímají odražené vysokofrekvenční zvukové vlny, jsou zde všeobecně platné instrukce pro výběr místa pro instalaci měřicího zařízení, v příloze A je souhrnná tabulka, která obsahuje výpis vhodných podmínek pro výběr metody měření průtoku. [3]

ČSN ISO 3455 Hydrometrie – Kalibrace vodoměrných přístrojů v přímých otevřených nádržích

Jelikož se skutečná rychlost a údaj na displeji mohou lišit, každé UZV měřidlo v řízeném metrologickém režimu (např. úřední měření) musí být kalibrováno. Kalibrace se řídí právě touto normou.

Kapitola 7.3 specifikuje postup při kalibrování UZV měřidel pro měření bodové rychlosti proudící vody. V normě jsou pokyny pro kalibraci – vlastnosti vody, připevnění senzoru, pokyny k provádění záznamu stanovené průměrné rychlosti, informace o dostatečném počtu bodů pro kalibrování, počet bodů závisí na rychlosti, do které bude provedena kalibrace, informace o potřebné ukliďovací době.[8]

ČSN EN ISO 772- Hydrometrie – terminologie

V normě jsou definice následujících termínů, které spadají do problematiky UZV průtokoměrů[1] Termíny a jejich definice na začátku této kapitoly jsou právě z této normy.

2.6 UZV MĚŘIDLA TYPU ADV

ADV průtokoměry fungují na principu vyhodnocení změny kmitočtu vysílaného ultrazvukového vlnění po jeho odrazu od částic unášených proudící tekutinou. Sonda průtokoměru tedy vysílá ultrazvukové pulzy do proudu tekutiny. Tyto pulzy se odrážejí od nehomogenit v proudu, jako jsou například bubliny plynu nebo pevné částice. Vzhledem k tomu, že se tyto nehomogenity pohybují s proudem, dochází k Dopplerovu jevu, tzn. k posunu frekvence odraženého signálu. Průtokoměr porovná frekvenci vysílaného a odraženého signálu a na základě tohoto rozdílu vypočítá rychlost proudění nehomogenit. ADV měří přímo rychlost nehomogenit, nikoliv rychlost samotné tekutiny. To znamená, že pro přesné měření průtoku vody je nutné, aby v ní bylo přítomno dostatečné množství nehomogenit. V opačném případě může být naměřená hodnota zkreslená.[9]

Tato práce se věnuje pouze metrologickým aspektům při měření bodové rychlosti, proto nebudu pojednávat o validaci způsobu výpočtu průtoku, ale budu pracovat s měřenými bodovými rychlostmi.

V následujícím textu je popsáno několik vybraných ADV měřidel dostupných na trhu.

Argonaut-ADV

Argonaut ADV od společnosti SonTek je díky menším rozměrům praktičtější a cenově dostupnější varianta, vhodná pro měření jezerech či vodních tocích, díky své schopnosti pracovat při nízkých rychlostech a v mělké vodě je také vhodný pro měření v bažinách a mokřadech. Měřicí sonda je dostupná ve 3D variantě. Veškeré zpracování signálu probíhá interně, což umožňuje bezkabelový provot. Vestavěný záznamník a baterie s vysokou kapacitou umožňují dlouhodobé nasazení a možnost připojení se k data loggeru pro získávání dat z měření v reálném čase.[10]



Obrázek 2.5.1 Argonaut-ADV [11]

MicroADV (SonTek)

Přístroj je ideální pro laboratorní měření rychlostí a pro jemné práce v terénu. MicroADV nabízí nejmenší vzorkovací objem ze všech přístrojů ADV a v kombinaci s kratší (50 mm) vzdáleností vzorkovacího objemu od přístroje umožňuje systému odebírat vzorky v extrémní blízkosti objektů a hranic.[12]

ADVOcean/Hydra (SonTek)

Přístroj může pracovat samostatně díky vestavěnému záznamníku a baterii nebo může být připojen k počítači pro získávání dat v reálném čase. Jeho schopnost detekce vzdálenosti ke dnu může být využita pro studium transportu sedimentů. Další výhodou ADVOcean/Hydra je schopnost měřit v mělčinách, a to už od 20 mm hloubky.[12]

Vector (Nortek)

Vector je koncipován pro měření v přímořských oblastech a oceánech. Je často využíván pro sledování transportu sedimentů, měření turbulence a ve studiích zaměřených na pobřeží. Tato verze je vhodná pro použití do hloubky až 300 metrů. Pro výzkum hlubokomořských proudů existuje také titanová varianta.[13]



Obrázek 2.5.2 Nortek Vector [14]

Vectrino (Nortek)

Variantu průtokoměru Vectrino od společnosti Nortek lze použít v hydraulických laboratořích i v oceánu. Nortek Vectrino disponuje novým softwarovým rozhraním, které poskytuje rozšířené možnosti, jako např. grafy rychlostních profilů v reálném čase, standardní odchylky rychlosti, energetická spektra a barevné obrysové grafy.[15]

Flow Tracker2

Předložená práce se zabývá metrologickými charakteristikami tohoto měřidla. Z těchto důvodů je v následujících odstavcích měřidlo popsáno podrobněji.

SonTek FlowTracker2 je terénní průtokoměr, který využívá Dopplerův princip pro měření rychlosti proudění vody. Systém se skládá z odděleného vysílače a přijímače, čímž zajišťuje maximální přesnost. Měřicí sonda je dostupná ve 2D a 3D variantě, umožní tak detailní analýzu složek rychlosti ve dvou nebo třech osách. Vyhodnocovací jednotka s barevným LCD displejem je se sondou propojena kabelem. Díky snadnému ovládní, automatickému výpočtu průtoku a stanovení nejistoty měření je FlowTracker dle výrobce ideální i pro uživatele bez předchozích zkušeností v oblasti hydrometrie. Naměřená data lze stáhnout do počítače a vyhodnotit – pomocí softwaru FlowTracker2.[16]

Konstrukce měřidla

FlowTracker2 se skládá z několika hlavních komponent, viz obrázek 2.4.1, které dohromady zajišťují jeho funkčnost a přesnost měření průtoku vody.

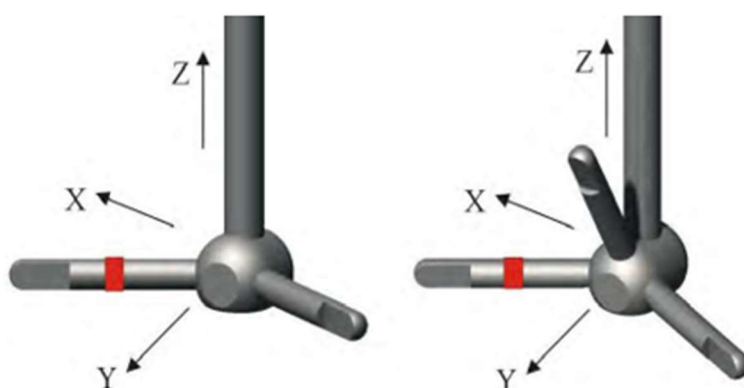
Sonda je klíčovou součástí FlowTrackeru, která se ponoří do vody a sbírá data o rychlosti proudění. Sonda obsahuje ultrazvukové vysílače a přijímače, které vysílají zvukové vlny do vodního prostředí. Tyto vlny se odrážejí od vodních částic a jsou snímány přijímači. Analýzou odražených signálů sonda určuje rychlost proudění v daném místě. Proces měření bude detailněji popsán dále v této kapitole. Na sondě se dále nachází teplotní a tlakový senzor. Teplotní senzor slouží ke stanovení teploty vody, tlakový senzor slouží pro záznam svislé odlehlosti sondy od hladiny, tyto informace jsou důležité pro výpočet průtoku, který se vypočítá jako součin rychlosti proudění a plochy průřezu vodního toku. Snímací sonda je robustní a odolná vůči vodnímu prostředí a nečistotám, čímž zajišťuje bezproblémové fungování FlowTrackeru i v náročných podmínkách.[17]

Vyhodnocovací jednotka zodpovídá za přijímání dat ze sondy v reálném čase, za jejich zpracování a za celkové fungování přístroje. Data zahrnují rychlost proudění, hloubku, teplotu a další parametry. Nachází se v robustním pouzdře a skládá se z několika klíčových komponent: řídicí jednotky (software FlowTracker2), LCD displeje, klávesnice, prostoru na baterie. LCD displej slouží k zobrazení softwaru FlowTracker2 na ručním zařízení a grafickému zobrazení nezpracovaných dat v reálném čase. Tlačítka na klávesnici slouží k navigaci v menu, potvrzování voleb a zadávání hodnot. Prostor na baterie se skládá z vodotěsného víka a kazety na 8 baterií typu AA. Během používání přístroje se zobrazuje na LCD displeji v horní liště ikona, která informuje o stavu nabití baterie. Vyhodnocovací jednotka je odolná proti prachu a vodě a odolává nárazům a vibracím. To umožňuje její použití i v náročných podmínkách v terénu.

Sonda je spojena s ohebným **kabelem**. Díky tomuto kabelu lze se sondou snadno manipulovat a umístit ji do měřeného toku v různých hloubkách. Toto propojení činí z FlowTracker2 univerzální nástroj vhodný pro širokou škálu aplikací. Kabel s délkou 1500 mm poskytuje dostatečný dosah sondy i v hlubších vodách a umožňuje snadné manévrování během jejího umístění do požadované polohy. Pro propojení sondy s ručním zařízením FlowTracker2 slouží **konektor**, vyroben z voděodolných materiálů s certifikací IP67. Stejně jako kabel je i konektor ohebný, což usnadňuje manipulaci se sondou. [17]



Obrázek 2.4.1 FlowTracker2 [17]

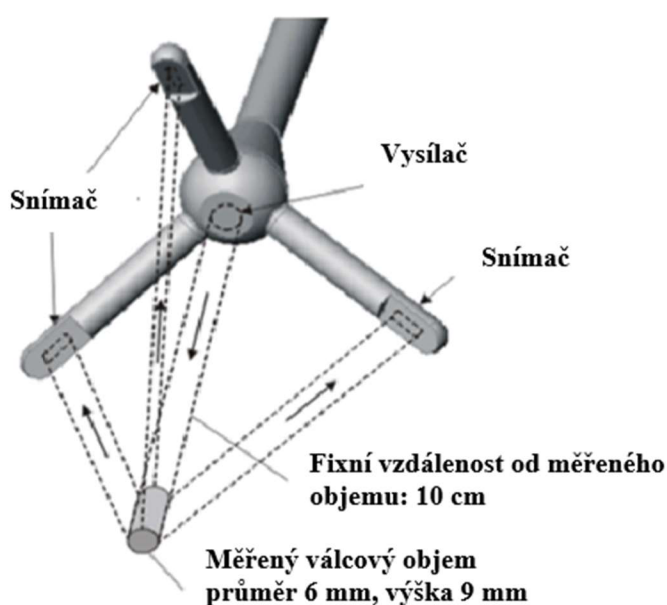


Obrázek 2.4.2 Sonda FlowTrackeru2 ve 2D a 3D variantě [17]

FlowTracker2 využívá bistatický Dopplerovský snímač [17], který se skládá z vysílače a 3 snímačů ultrazvukových signálů (v případě 2D varianty jsou snímače 2). viz obrázek 2.4.2.

Proces měření:

1. Vysílač generuje úzký paprsek ultrazvukového signálu s průměrem 6 mm; viz obrázek 2.4.3
2. tento signál se odráží od nehomogenit v proudu tekutiny, jako jsou bubliny plynu nebo pevné částice;
3. odražený signál je zachycen přijímačem;
4. rozdíl frekvencí mezi vysílaným a odraženým signálem slouží k výpočtu rychlosti proudění nehomogenit.



Obrázek 2.4.3 Pozice a velikost měřeného objemu u 3D varianty [23]

Stanovení rychlosti je tedy založeno na vyhodnocení změny kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od částic unášených proudící tekutinou. ADV průtokoměry tedy měří přesněji vzato rychlosti pohybu nehomogenit a ne vodního proudu.

Bistatické osy jsou umístěny geometricky uprostřed rovinného úhlu mezi vysílačem a daným snímačem. Pevná vzdálenost mezi nimi zajišťuje opakovatelnost měření rychlosti v objemu kapaliny cca $0,3 \text{ cm}^3$. FlowTracker2 pracuje s pulsně koherentním zpracováním Dopplerova signálu. Na rozdíl od klasického způsobu vysílá dva časově posunuté UZV signály. Zpracováním těchto signálů se získává velmi přesná hodnota rychlosti nehomogenit v proudu. Měřicí rozsah FlowTracker2 je do $\pm 4 \text{ m/s}$, dle technických specifikací výrobce (obrázek 2.4.4) je možné dosáhnout výborných výsledků i pro nízké rychlosti pod $0,01 \text{ m/s}$.

Kromě rychlosti FlowTracker2 měří a vyhodnocuje i další parametry, jako je teplota. Tyto informace se zobrazují na displeji a slouží k hlubšímu pochopení měřeného procesu.

Product Specifications	
Part I: Probe	
Velocity Range	±0.001 to 4.0 m/s (0.003 to 13 ft/s)
Velocity Resolution	0.0001 m/s (0.0003 ft/s)
Velocity Accuracy	±1% of measured velocity, 0.25 cm/s
Acoustic Frequency	10.0 MHz
Sampling Volume Location	10 cm (3.93 in) from the center transducer
Minimum Depth	0.02 m (0.79 in)
Temperature Sensor	Resolution: 0.01° C, Accuracy: 0.1° C
Tilt Sensor	Accuracy: 1.0°
Communication Protocol	RS-232
Operating/Storage Temperature	-20° C to 40° C (-4° F to 104° F)
Physical Specifications	
-Probe Head Dimensions	(L)13.3 cm (5.22 in); (W) 6.1 cm (2.39 in); (H) 2.3 cm (0.90 in)
-Standard Cable Length	1.5 m (4.92 ft)
-Weight in Air	0.90 kg (1.98 lbs)
-Weight in Water	0.30 kg (0.66 lbs)
Part II: Handheld	
Power	
-Input Battery Voltage	8 - 12 VDC
-Power Supply	8 X AA Batteries
-Battery Life	15 hours continuous use, typical settings ¹
-Power Consumption	1 W (Average)
GPS	
-H. Position Accuracy	Up to 2.5 m (8.2 ft) nominal ²
-Frequency	L1 (1.575 MHz), SBAS compensation (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN)
LCD	
-Resolution	320 X 240 TFT Transmissive
Bluetooth	
	Class 2, Range = 10 m (33 ft) nominal
USB	
	Micro USB, IP-67
Probe Interface	
-Battery Power to Probe	8 - 12 VDC
-Data Transfer	RS-232
-Data Storage	16 GB. Up to 10k discharge measurements. Up to 10 million velocity samples
Operating Temperature	
	-20° to 40°C (-4°F to 104°F)
Storage Temperature	
	-30° to 70° C (-22° F to 158° F) ³
Physical Specifications	
-Waterproof Rating	IP-67 (1m submersible)
-Handheld Dimensions	(L)10.4 cm (4.1 in); (W) 6.4 cm (2.5 in); (H) 23.7cm (9.3 in)
-Weight in Air	0.75 kg (1.65 lbs)
-Weight in Water	-0.25 kg (-0.55 lbs)

Obrázek 2.4.4 Technické specifikace měřidla FlowTracker2[18]

3 MOTIVACE PRÁCE

Experimentální výzkum v této práci měl za cíl shromáždit dostatečné množství dat z pravidelně prováděných měřicích cyklů s UZV měřidlem bodových rychlostí FlowTracker2 a následně tato data zpracovat do využitelné podoby a vyhodnotit.

Experimentální práce se v souvislosti s měřidlem věnovala následujícím oblastem:

- mezilehlé preciznosti měření vykazované rychlosti;
- dlouhodobá stabilita nízkých rychlostí;
- časová variabilita vykazovaných rychlostí.

Výsledné formuláře, grafy a tabulky slouží jako podklady k dalším experimentálním pracím a jsou součástí zprávy k závěrečné oponentuře úkolu PRM 2023 č. VIII/9/23[19], jejímž cílem bylo posoudit možnosti využití UZV měřidel rychlostí vodního proudu v oblasti úředního měření průtoku v prizmatických profilech s volnou hladinou.

4 POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Experimentální práce se věnovaly posouzení UZV měřidla FlowTracker2 od společnosti Sontek. V následující kapitole je uveden popis zkušební trati v Laboratoři vodohospodářského výzkumu, na které experimentální práce probíhaly. Popis se schématem detailně přiblíží její konstrukci, rozměry, vlastnosti a vybavení, dále byly zmíněny její specifické vlastnosti, které mohly mít vliv na výsledky měření. Pro zajištění spolehlivosti a přesnosti dat byla zavedena specifická metodika jejich sběru a výpočtu, která je popsána v závěru této kapitoly.

4.1 POUŽITÉ ADV MĚŘIDLO

Pro experimentální měření v laboratoři bylo použito měřidlo FlowTracker2 od společnosti Sontek. Měřidlo bylo zapůjčeno od zástupce společnosti Sontek pro Českou republiku společnosti AQUAMONITORING, s.r.o. Detailnímu popisu měřidla se věnuje kapitola 2.4.4 této bakalářské práce.

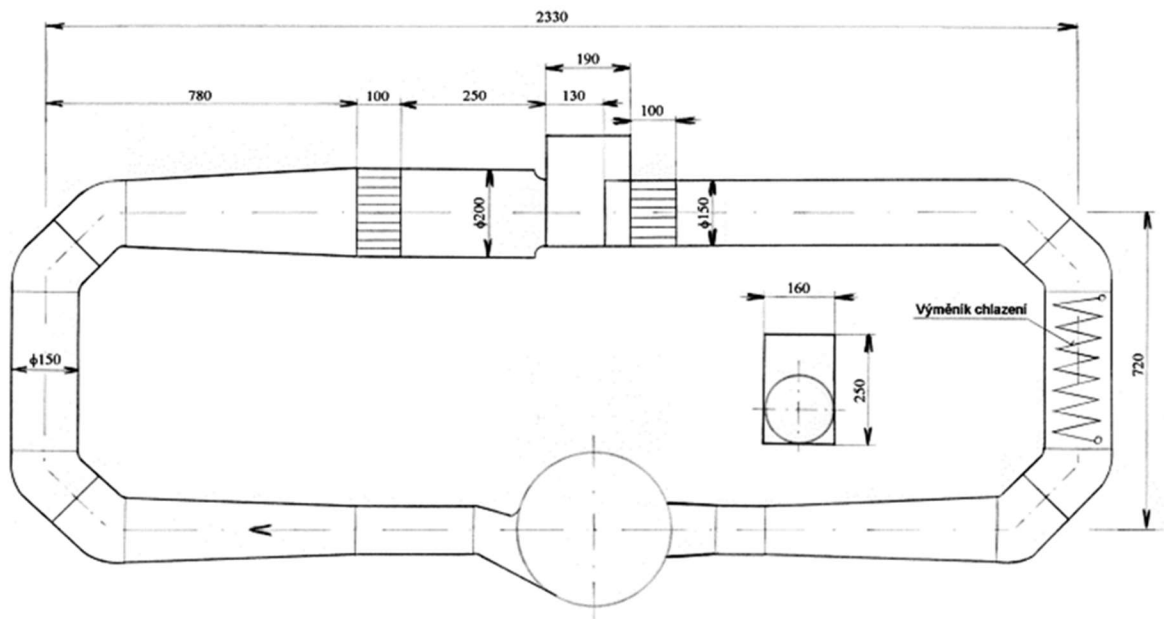
4.2 ZKUŠEBNÍ TRAŤ MĚŘIDEL BODOVÝCH RYCHLOSTÍ

Zkušební trať (obrázek 4.2.1) disponuje dvěma měrnými prostory, pro experimentální práce s měřidlem FlowTracker2 byl využit 2. měrný prostor. Okruh trati je zhotoven z plastových PVC trub a tvarovek s vnitřním průměrem 150 mm nebo 200 mm. Pro kontrolní měření s optickými měřicími metodami disponují měrné prostory svislými rovinnými bočními stěnami ze skla.

Průtokovou kapacitu trati zajišťuje odstředivé čerpadlo o příkonu 1,5 kW řízené měničem frekvence. Pro optimalizaci proudových parametrů v oblasti nejvyšších rychlostí je výstup z čerpadla vybaven prodlouženým difuzorem. Měrná trať je napojena na výkonný chladicí systém, který umožňuje udržovat stabilní teplotu kapaliny od 2 °C výše. V rámci výzkumných prací byla zvolena stabilní teplota vody v trati 22 °C s tolerancí ± 1 °C. Vliv teploty na parametry měřené testovanými měřidly nebyl předmětem experimentů.

Vyjma měřicího zařízení FlowTracker2 byl pro experimentální práce na zkušební trati použit ponorný teploměr s digitálním displejem pro měření teploty T a zařízení pro měření otáček motoru oběhového čerpadla n . Těmto ostatním měřicím zařízením se věnuje následující kapitola.

Zkušební trať byla napuštěna pitnou vodou bez dodatečného sycení odraznými částicemi.



Obrázek 4.2.1 Schéma zkušební trati [19]

4.3 OSTATNÍ MĚŘIDLA A POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ

I přesto, že FlowTracker2 disponuje sondou s vestavěným senzorem pro měření teploty okolní kapaliny, během provádění experimentálních prací byl na zkušební trať nainstalován další ponorný teploměr s digitálním displejem, jehož měřicí rozsah přesahoval rozpětí používaných pracovních hodnot 22 ± 1 °C. Teploměr byl nainstalován v 1. měrném prostoru a sloužil k poskytování průběžných informací o teplotě vody ve zkušební trati.

Hodnoty teplot vykazované měřicím zařízením FlowTracker2 byly totožné s hodnotami vykazovanými ponorným teploměrem, výhoda využití ponorného teploměru během experimentálních prací spočívala v kontrole správnosti teplot vykazovaných FlowTrackerem2. Hodnoty z digitálního displeje byly během experimentálních prací zapisovány do připravené tabulky.

Na trati je dále nainstalováno optoelektronické zařízení pro měření otáček motoru oběhového čerpadla n [ot/min] s možností přenosu naměřených dat do měřicího počítače. Záznam otáček n při naměřených rychlostí je pro experimentální práci důležitý, jelikož veškeré získané výsledky se k těmto otáčkám budou vztahovat.

4.4 POSTUP MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Na zkušební trati byly v pravidelných třítydenních intervalech prováděny experimentální práce.

Před zahájením každého měřicího cyklu byla sonda FlowTrackeru2 nainstalována do 2. měrného prostoru. Stejná poloha sondy při každém měření byla zajištěna kovovým laboratorním držákem a pomocnými plastovými díly, které pomohly docílit stejných vzdáleností sondy ode stěn a dna a které se po upevnění sondy do kovového držáku odejmuly. Kovový laboratorní držák lze vidět na obrázku 4.4.2.

Pro každý jednotlivý měřicí cyklus v celém rozsahu posuzovaných rychlostí byl vytvořen formulář, viz obrázek 4.4.2, který obsahoval informace o měřidle, datu, pořadovém čísle měření, měrné vodivosti vody v trati a kapacitě baterie a tabulku pro zápis otáček n a naměřených rychlostí v a záznam teplot vody v experimentální trati. Rychlostní rozsah byl rozdělen do 13 úrovní dle řídicích frekvencí čerpadla. Formulář obsahoval i řádek pro měření nulových rychlostí.

Měření probíhalo postupným nastavováním otáček čerpadla a odečítáním rychlostí indikovaných měřidlem. Pro každý stupeň otáček čerpadla bylo měření opakováno desetkrát ($N = 10$) pro zajištění statistické relevance. Naměřené hodnoty otáček čerpadla n a rychlostí proudění v byly zaznamenávány do tabulky postupně, měření probíhalo vždy po řádcích, kdy nejprve měřily hodnoty pro sudé řádky, tedy postupně stoupající rychlosti, druhá polovina měření probíhala sestupně pro liché řádky, tedy pro rychlosti klesající až k „nulové“ rychlosti.

Z deseti opakovaných měření pro každý stupeň otáček čerpadla a pro obě skupiny (stoupající a klesající rychlost) byly vypočítány průměrné hodnoty n_{prum} (4.4.1) a v_{prum} (4.4.2) a směrodatná odchylka S_v (4.4.3).

$$n_{prum} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i ; (4.4.1)$$

$$v_{prum} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i ; (4.4.2)$$

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{prum})^2} ; (4.4.3)$$

kde:

n_{prum} – průměrná hodnota měřeného parametru (otáček čerpadla)

v_{prum} – průměrná hodnota měřeného parametru (rychlost proudění)

N – počet měření

i – i -tá hodnota měřeného parametru

Chybová hlášení:

V průběhu či na konci každého měření se stávalo, že vyhodnocovací jednotka společně se zobrazením naměřených veličin zobrazila i chybová hlášení. Všechna tato hlášení byla zaznamenána do formuláře 4.4.4 jako barevné podbarvení dle druhu chyby.

Většina chybových hlášení (viz obrázek 4.4.1) souvisela s parametrem SNR (Signal to Noise Ratio), který při měření bodové rychlosti vodního proudu hraje klíčovou roli. Jedná se o poměr odraženého UZV signálu k okolnímu šumu, vyjádřený v logaritmických jednotkách dB. Za běžných podmínek by hodnota SNR měla být vyšší než 10 dB, aby bylo zajištěno spolehlivé měření rychlosti, nicméně dle manuálu k FlowTracker2 [17] je i při hodnotě 4 dB dosaženo dostatečné přesnosti. Nižší hodnoty SNR obvykle naznačují nízký počet odrazných nehomogenit v proudu měřené kapaliny. To může být způsobeno nízkou koncentrací suspendovaných částic, čistotou kapaliny nebo nevhodným umístěním UZV sondy.

Mezi další chybová hlášení patřila následující:

- **Large SNR variation** – hlášení, kdy variabilita měřeného signálu z jednotlivých snímačů je vyšší než prahová hodnota 5 dB. Může se jednat o vysoce turbulentní proudění, provzdušněný proud či rušení od okolní překážky. Nemusí se však jednat o nesprávné měření;
- **SNR Threshold Variation** – souvisí se zvýšenou odchylkou mezi jednotlivými bodovými měřeními. Hlášení se objeví vždy po dokončení bodového měření a indukuje zpravidla prudkou změnu režimu proudění mezi několika po sobě jdoucími měřeními;
- **Low SNR** – takové hlášení se zobrazí, pokud je SNR některého paprsku nižší než 4,0 dB
- **Beam SNRs not similar** – toto hlášení nastává, pokud je rozdíl mezi libovolnými dvěma paprsky větší než prahová hodnota SNR, může to znamenat rušení od podvodní překážky nebo potenciální problém se sondou, pokud přístroj hlásí takové upozornění, měření se zopakuje



Obrázek 4.4.1 Chybová hlášení (červeně) zobrazena na vyhodnocovací jednotce

I když absolutní přesnost měřených rychlostí nebyla pro výzkum klíčová, měřidlo FlowTracker 2 prošlo kalibrací v akreditované kalibrační laboratoři vodoměrných měřidel ve VÚVH v Bratislavě. Kalibrace probíhala v rozmezí rychlostí od 0,05 m/s do 2,0 m/s. Na základě dat z kalibrace byla stanovena kalibrační funkce:

$$v_{FT2kor} = 1,0179 \cdot v_{FT2} - 0,0033; \quad (4.4.1)$$

kde:

V_{FT2kor} – korigovaná hodnota rychlosti

V_{FT2} – hodnota vykazována přístrojem FlowTracker2

Tato funkce je nutná pro korekci naměřených dat z FlowTrackeru2. Jinými slovy, naměřené hodnoty rychlostí korigujeme rovnicí (4.4.1). Kalibrační funkce byla aplikována na všechna data z FlowTrackeru2.

Doba jednotlivých měření rychlostí byla defaultně nastavena na 10 s s rozlišením 1 mm/s. Toto nastavení je vhodné pro základní měření rychlosti proudění. Pro specifické potřeby experimentu bylo možné nastavení upravit.

Na základě naměřených dat a vypočítaných průměrných hodnot a směrodatných odchylek byly vytvořeny grafy pro analýzu závislosti:

- Kalibrační křivka: Graf zobrazující závislost vykazované korigované průměrné rychlosti v_{prum} na otáčkách čerpadla n ;
- graf směrodatné odchylky: Graf zobrazující závislost směrodatné odchylky vykazované korigované rychlosti Sv na otáčkách čerpadla n .

Tyto závislosti (grafy) sloužily k následujícímu posouzení metrologických charakteristik měřidla. Grafy také pomáhaly odhalit případné chyby v měření nebo odchylky od očekávaného chování. Například prudké výkyvy v grafech mohly poukázat na problémy s měřicím zařízením, chyby v zaznamenávání dat nebo nekontrolovatelné vlivy v experimentálním prostředí.

Kalibrační křivka umožnila posoudit přesnost měřidla. Kvalitní shoda mezi naměřenými daty a proloženou linií indikovala, zda FlowTracker2 správně zaznamenává průměrnou rychlost proudění v závislosti na otáčkách čerpadla.

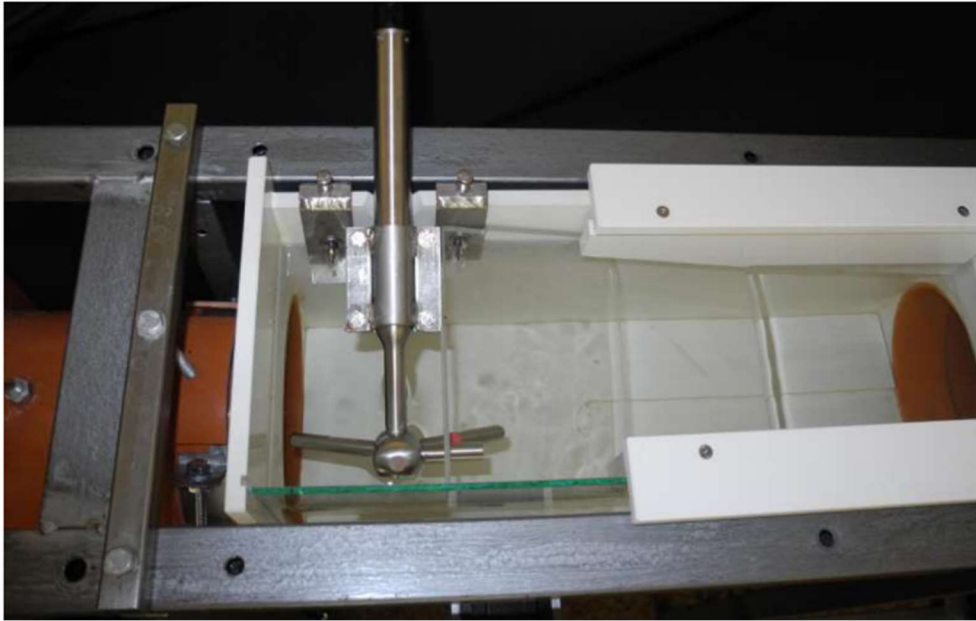
Směrodatná odchylka Sv zobrazená v druhém grafu poskytla informaci o míře rozptylu naměřených hodnot okolo průměrné hodnoty dané rychlosti. Nízká hodnota Sv signalizovala vysokou spolehlivost a konzistenci měření, zatímco vysoká hodnota Sv mohla poukazovat na vliv rušivých faktorů, nepřesnosti měřidla nebo nestabilní podmínky v experimentu.

Oběma grafy byly proloženy lineární funkce. Z proložených funkcí byly získány parametry a , b , c , d , které charakterizují sklon a polohu linie. Tyto parametry jsou dále využity pro veškerá další vyhodnocení týkající se experimentu s měřením rychlosti proudění. Práce s jednotlivými páry průměrných hodnot n_{prum} a v_{prum} pro každý stupeň otáček čerpadla již v tomto stadiu není nutná, jelikož parametry lineární funkce postihují dosažené závislosti s dostatečnou přesností. Tímto přístupem je dosaženo kompaktnějšího a efektivnějšího zpracování dat a zároveň je zachována potřebná míra přesnosti pro další analýzy a výpočty.

Popsaná metodika měření s UZV měřidlem FlowTracker2 umožňuje získat data o rychlosti proudění vody. Rozdělení měření na sudé a liché řádky, opakování měření a výpočet průměrných hodnot a směrodatných odchylek zajišťují dostatečnou validitu dat.

Vzhledem k velkému rozsahu dat nejsou všechny záznamy součástí předložené bakalářské práce a jsou uloženy u zpracovatele a vedoucího práce.

Pokud během experimentálních prací došlo k překročení tolerance teploty vody v trati, byl obsluhou manuálně zapnut chladicí systém, pokud vyhodnocovací jednotka měřicího přístroje podala hlášení o nízkém stavu baterie, který vedl k vypnutí přístroje, byla sada 8ks AA baterií vyměněna za nové.



Obrázek 4.4.2 Instalace sondy měřidla FlowTracker2 v druhém měrném prostoru zkušební trati



Obrázek 4.4.3 Pohled na vyhodnocovací jednotku a 2.měrný prostor zkušební trati

Stanovení závislosti rychlosti vykazované měřidlem FlowTracker2 (AQ) na otáčkách čerpadla kalibrační trati

Číslo měření:	1
Datum měření:	30.05.2023

Označení snímače	255317
Označení vyhodnocovací jednotky	FT2H2252002
Majitel:	Aquamonitoring, s.r.o.

Baterie	Napětí :	11.3 V	Stav na začátku měření:	54%
	Článek:	Alkalický	Stav na konci měření:	18%

Měřené a vypočtené hodnoty

Měření	Teplota vody [°C]	Frekvence měniče [Hz]	Otáčky čerpadla n [ot.min ⁻¹]													Naměřené rychlosti v [m.s ⁻¹]										Směrodatná odch. S _v [m.s ⁻¹]		
			n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	n ₆	n ₇	n ₈	n ₉	n ₁₀	n _{prum}	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅	v ₆	v ₇	v ₈	v ₉	v ₁₀	v _{prum}				
0	22.4	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	-0.0025	-0.0023	-0.0025	-0.0030	-0.0025	-0.0024	-0.0020	-0.0027	-0.0027	-0.0031	-0.003	0.0003
1	21.4	1.1	28.62	28.15	28.27	28.34	28.44	28.62	28.66	28.63	28.63	28.65	28.5	0.0275	0.0261	0.0257	0.0224	0.0221	0.0235	0.0227	0.0249	0.0243	0.024	0.024	0.024	0.024	0.0019	
2	21.8	1.7	48.85	48.90	48.95	48.93	48.90	48.93	48.89	48.89	48.84	48.90	48.9	0.0471	0.0487	0.0459	0.0453	0.0465	0.0451	0.0461	0.0457	0.0480	0.0460	0.046	0.046	0.046	0.0012	
3	21.0	2.5	73.07	73.05	72.97	72.98	72.99	72.99	72.96	72.89	72.82	72.78	73.0	0.0747	0.0688	0.0677	0.0656	0.0687	0.0703	0.0645	0.0665	0.0654	0.0684	0.067	0.067	0.067	0.0040	
4	22.3	3.5	102.60	102.47	102.46	102.53	102.52	102.61	102.73	102.77	102.71	102.70	102.6	0.0974	0.0961	0.0968	0.0953	0.0978	0.0966	0.0979	0.0978	0.0964	0.0977	0.097	0.097	0.097	0.0009	
5	21.0	5.0	147.52	147.59	147.76	147.78	149.69	147.80	147.86	147.94	147.90	147.81	148.0	0.1348	0.1384	0.1399	0.1388	0.1390	0.1383	0.1337	0.1332	0.1445	0.1459	0.139	0.139	0.139	0.0042	
6	22.3	7.0	205.54	205.81	205.86	205.83	205.93	205.93	205.83	206.00	205.95	205.95	205.9	0.1929	0.1929	0.1954	0.1971	0.1962	0.1966	0.1972	0.1987	0.1984	0.1957	0.1940	0.196	0.196	0.0018	
7	21.1	10.0	291.25	291.20	291.25	291.10	291.05	291.15	291.15	291.15	291.05	290.86	291.1	0.2722	0.2728	0.2871	0.2769	0.2696	0.2700	0.2824	0.2715	0.2767	0.2659	0.275	0.275	0.0064		
8	22.0	15.0	416.78	418.40	419.11	419.21	419.41	419.82	420.13	420.23	420.54	420.74	419.4	0.3930	0.3993	0.4037	0.4062	0.4023	0.4014	0.4026	0.4010	0.4015	0.4079	0.402	0.402	0.0040		
9	21.6	23.0	632.11	629.27	629.04	628.82	628.59	628.82	628.13	628.36	628.13	628.13	628.9	0.6018	0.5983	0.6037	0.6013	0.6044	0.5990	0.6028	0.6026	0.6004	0.6089	0.602	0.602	0.0030		
10	22.0	35.0	921.10	923.58	924.55	924.06	925.54	927.03	927.03	926.54	928.03	928.53	925.6	0.8691	0.8758	0.8773	0.8819	0.8970	0.8850	0.8939	0.8832	0.8982	0.8780	0.884	0.884	0.0097		
11	22.5	46.0	1254.90	1252.17	1251.26	1250.45	1248.55	1245.85	1245.85	1238.78	1237.82	1237.82	1246.3	1.1690	1.1992	1.1962	1.2023	1.1967	1.1890	1.1882	1.1943	1.1995	1.1804	1.191	1.191	0.0102		
12	21.3	51.0	1376.89	1373.60	1372.51	1369.17	1368.08	1366.00	1363.85	1360.63	1358.55	1358.49	1366.8	1.2925	1.3087	1.3192	1.3114	1.3244	1.3169	1.3098	1.2997	1.2986	1.3107	1.309	1.309	0.0099		

Hodnoty odchylek odečtených z přístroje

Měření	Frekvence měniče [Hz]	S _{průměr}
0	0.0	0.00020
1	1.1	0.00488
2	1.7	0.00142
3	2.5	0.00996
4	3.5	0.00046
5	5.0	0.00587
6	7.0	0.00098
7	10.0	0.00701
8	15.0	0.00187
9	23.0	0.00321
10	35.0	0.00373
11	46.0	0.00514
12	51.0	0.00506

$$n_{prum} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$$

$$v_{prum} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{prum})^2}$$

Poznámky k měření:

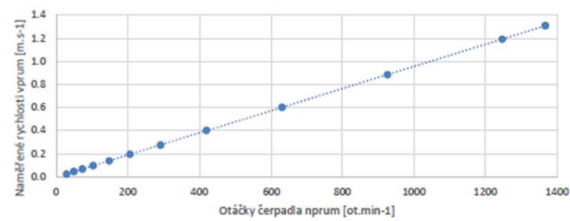
Změřena vodivost kapaliny přístrojem DISt 3 EC Tester firmy HANNA.

σ = 492 μS·m⁻¹

Hlášení přístroje :

Large SNR Variation
SNR Threshold Variation

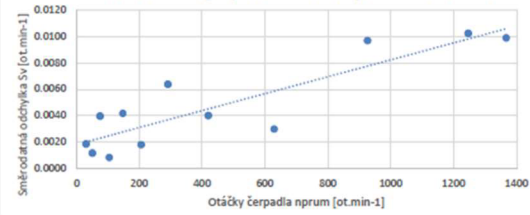
Závislost rychlosti vykazované FlowTracker2 (AQ) na otáčkách čerpadla kalibrační trati



Koefficienty rovnice grafu:

a =	0.000959	-0.002038	Hodnota spolehlivosti:	
b =	-0.00204	m.s ⁻¹	R ₁ ² =	0.999991

Závislost směrodatná odchylna rychlosti vykazované FlowTracker2 (AQ) na otáčkách čerpadla kalibrační trati



Koefficienty rovnice grafu:

c =	0.00000639	0.001844	Hodnota spolehlivosti:	
d =	0.001844	-	R ₂ ² =	0.787030

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU

V souladu s postupem popsaným v kapitole 4 bylo provedeno celkem 12 měřicích cyklů. Z tohoto počtu byla první dvě měření s FlowTracker2 klasifikována jako zkušební. Tato zkušební měření sloužila k seznámení se s měřicím přístrojem, jeho softwarem a zkušební tratí. Při zpracování naměřených dat proto nebyla tato první dvě měření brána v úvahu. V případě, že je nutné výsledky vztahovat k prvnímu měření, bude bráno v potaz oficiální třetí měření, dále v grafech označeno jako M3. V této kapitole je popsán způsob vyhodnocení výsledků a jejich samotná prezentace pomocí grafů.

Níže prezentované výsledky experimentálních prací byly součástí zprávy k závěrečné oponentuře úkolu Plánu rozvoje metrologie ÚNMZ. [19]

5.1 MEZILEHLÁ PRECIZNOST MĚŘENÍ VYKAZOVANÉ RYCHLOSTI

V oblasti metrologie se setkáváme s pojmy "opakovatelnost", "reprodukovatelnost" a "mezilehlá preciznost", které se zabývají mírou shody mezi výsledky měření, avšak s ohledem na specifické podmínky, za nichž tato měření probíhají. Pro správné pochopení a interpretaci dat je důležité si uvědomit rozdíly mezi těmito charakteristikami. [20]

Opakovatelnost se zaměřuje na měření prováděná v co nejkratších časových intervalech za prakticky neměnných okrajových podmínek. To zahrnuje stejnou metodu měření, stejného operátora, stejné měřidlo, stejné místo měření a stejný objekt měření. Opakovatelnost tak vyjadřuje stabilitu a přesnost měřicího procesu a jeho odolnost vůči náhodným vlivům.

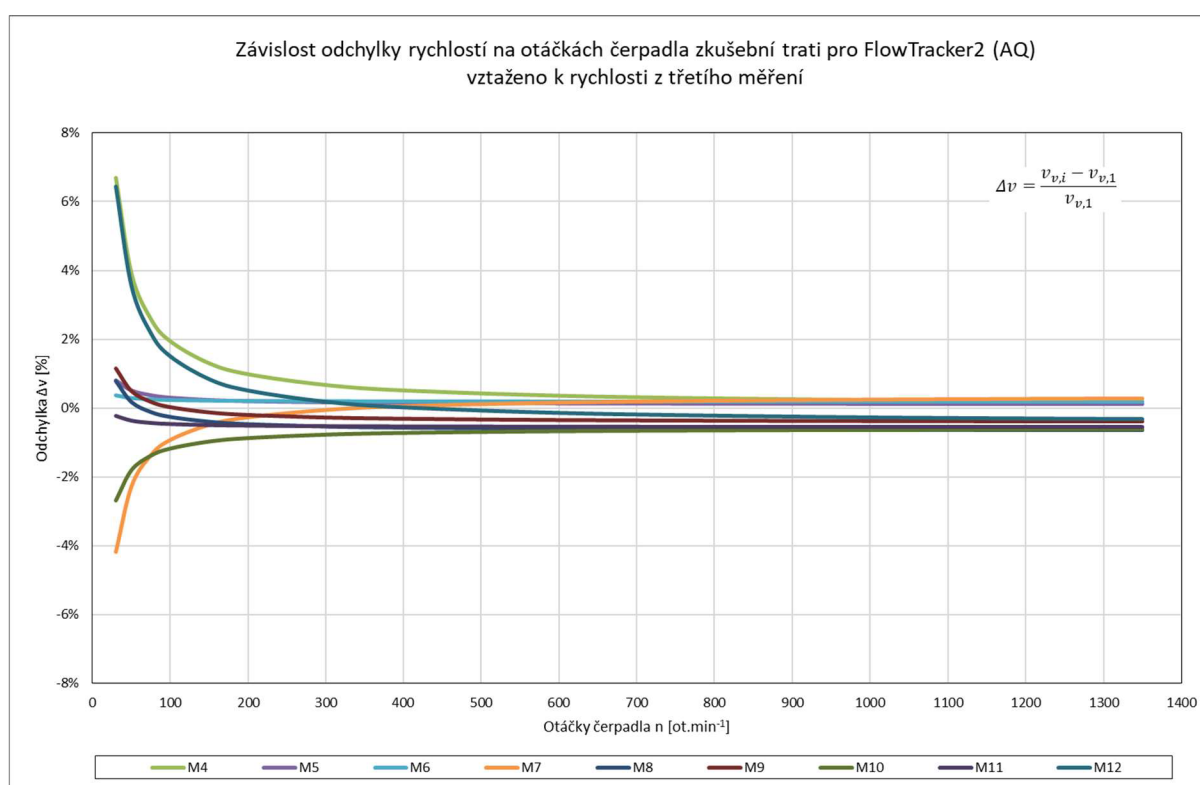
Reprodukovatelnost naproti tomu umožňuje změny v prakticky všech aspektech měřicího procesu, včetně metody měření, operátora, měřidla, místa měření a objektu měření. Reprodukovatelnost vyjadřuje, zda je možné dosáhnout shodných výsledků měření i v případě, že se tyto aspekty mění.

Od definice opakovatelnosti se případ provedených experimentálních prací odlišuje v jednom klíčovém aspektu: dlouhodobý charakter měření. Protože jednotlivá měření (měřicí cykly) nejsou prováděna v krátkých časových intervalech, ale s pravidelnými prodlevami 3 týdnů, nelze tedy korektně hovořit ani o opakovatelnosti. Stejně tak reprodukovatelnost není pro případ těchto experimentálních prací ideální, jelikož zahrnuje příliš široké spektrum možných změn v měřicím procesu.

Pro tyto účely se zavádí termín "mezilehlá preciznost měření", který je blízký podmínkám opakovatelnosti, ale s tím rozdílem, že zahrnuje delší časové období za ostatních neměnných aspektů měřicího procesu. To znamená, že se metoda měření, operátor,

měřidlo, místo měření a objekt měření během měření nemění, avšak časové intervaly mezi jednotlivými měřeními jsou delší.

Mezilehlá preciznost tak poskytuje informaci o tom, jak moc se výsledky měření liší v závislosti na čase, i když ostatní aspekty měřicího procesu zůstávají konstantní. Vzhledem k dlouhodobému charakteru našeho měření je tak mezilehlá preciznost nejvhodnější charakteristikou pro vyhodnocení variability naměřených dat. Někdy je mezilehlá preciznost měření nazývána replikovatelností. [19]



Graf 5.1.1 Závislost odchytky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k rychlosti z třetího měření

Graf 5.1.1 zobrazuje závislost relativní odchytky rychlosti proudění naměřené FlowTrackerem2, od referenčního měření M3 na otáčkách oběhového čerpadla. Graf tedy zobrazuje výsledky pro 9 provedených měření.

Závislost rychlosti na otáčkách čerpadla je vždy zpracována a prezentována ve formuláři měření, viz obrázek 4.4.4. Protože přímé zobrazení výsledků (lineární trendy s parametry a a b) všech opakovaných měření v jednom grafu by vedlo k překrývání se velkého množství přímek vzhledem k relativně malým odchytkám, je pro srozumitelnější vizualizaci, proto vhodnější zobrazit relativní odchytky trendů jednotlivých měření

od referenčního měření. V tomto případě bylo jako referenční měření zvoleno třetí provedené měření M3.

Relativní odchylka od vztažného měření je definována rovnicí 5.1.1. Tato odchylka je vyjádřena v procentech a slouží k porovnání relativní přesnosti jednotlivých měření vůči vztažné hodnotě.

$$\Delta v = \frac{v_{vi} - v_{v3}}{v_{v3}} [\%]; (5.1.1)$$

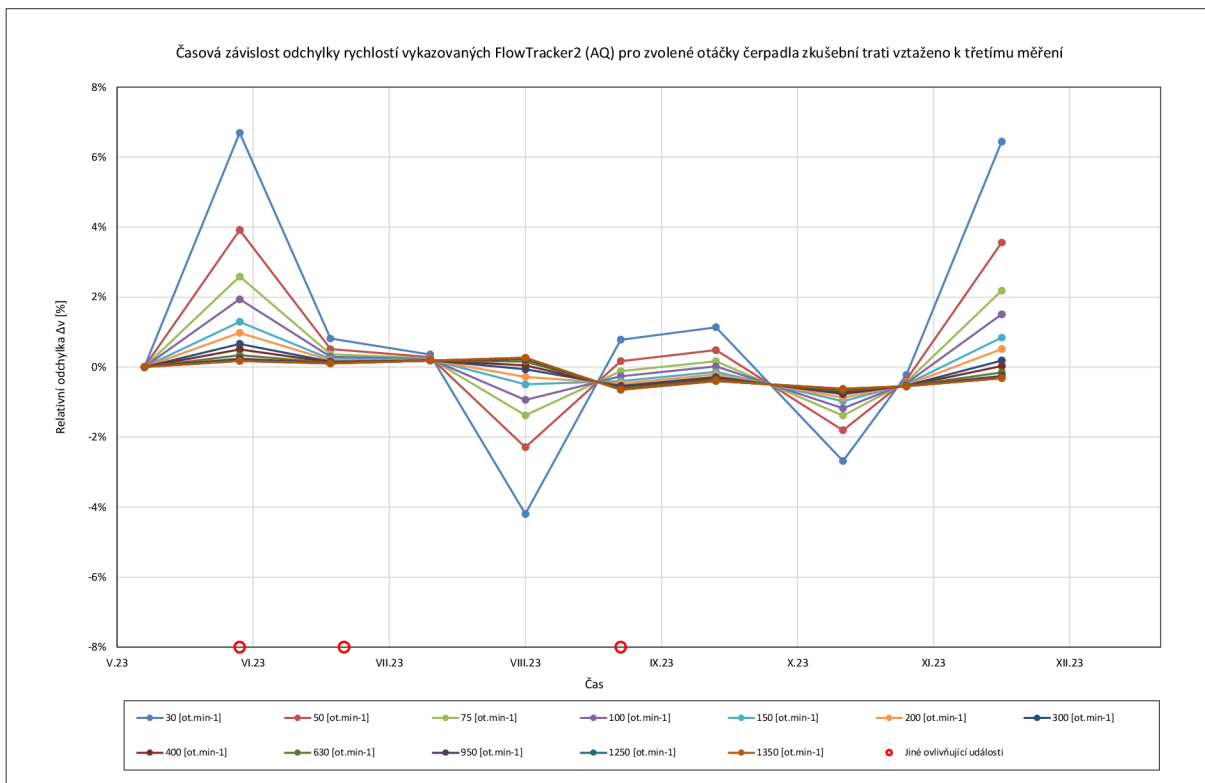
kde:

Δv – relativní odchylka;

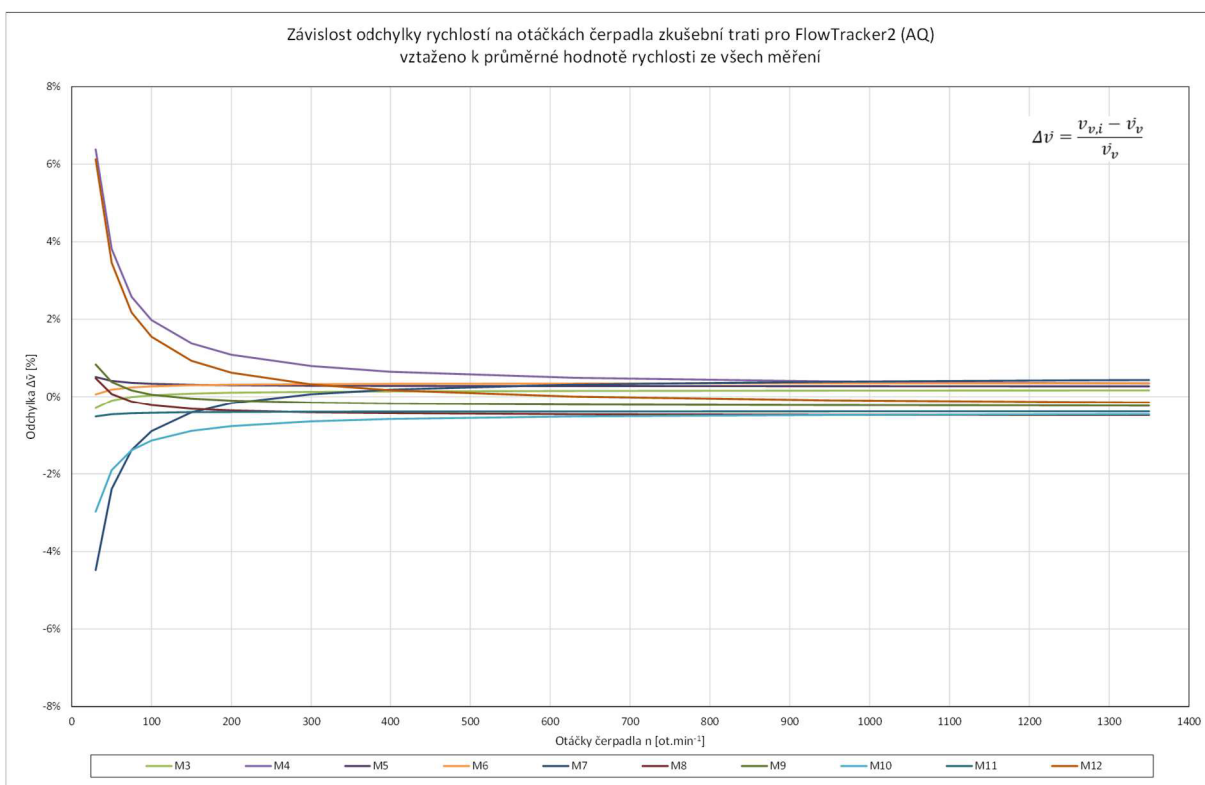
v_{vi} – hodnota rychlosti daného měření;

v_{v3} – hodnota rychlosti ze vztažného (třetího) měřicího cyklu.

Graf 5.1.1 nám umožňuje posoudit mezilehlou preciznost hodnoty rychlosti proudění naměřené UZV měřidlem mezi jednotlivými dny (cykly) měření. Nicméně, tento graf nám neposkytuje dostatek informací o vývoji (změně chování) měřené hodnoty rychlosti za delší časové období. Proto byl graf transformován do podoby grafu 5.1.2. Na vodorovné ose je zobrazeno datum měření a na svislé ose jsou vyneseny relativní odchylky rychlosti pro zvolené otáčky čerpadla zkušební trati. Vztažnou rychlostí je v tomto případě rychlost naměřená při třetím měření daným měřidlem. Díky této transformaci můžeme sledovat, jak se relativní odchylka rychlosti liší od referenční hodnoty v průběhu času. Na grafu jsou k příslušným datům vyznačeny také jiné ovlivňující události, mezi které patří výměna baterií.



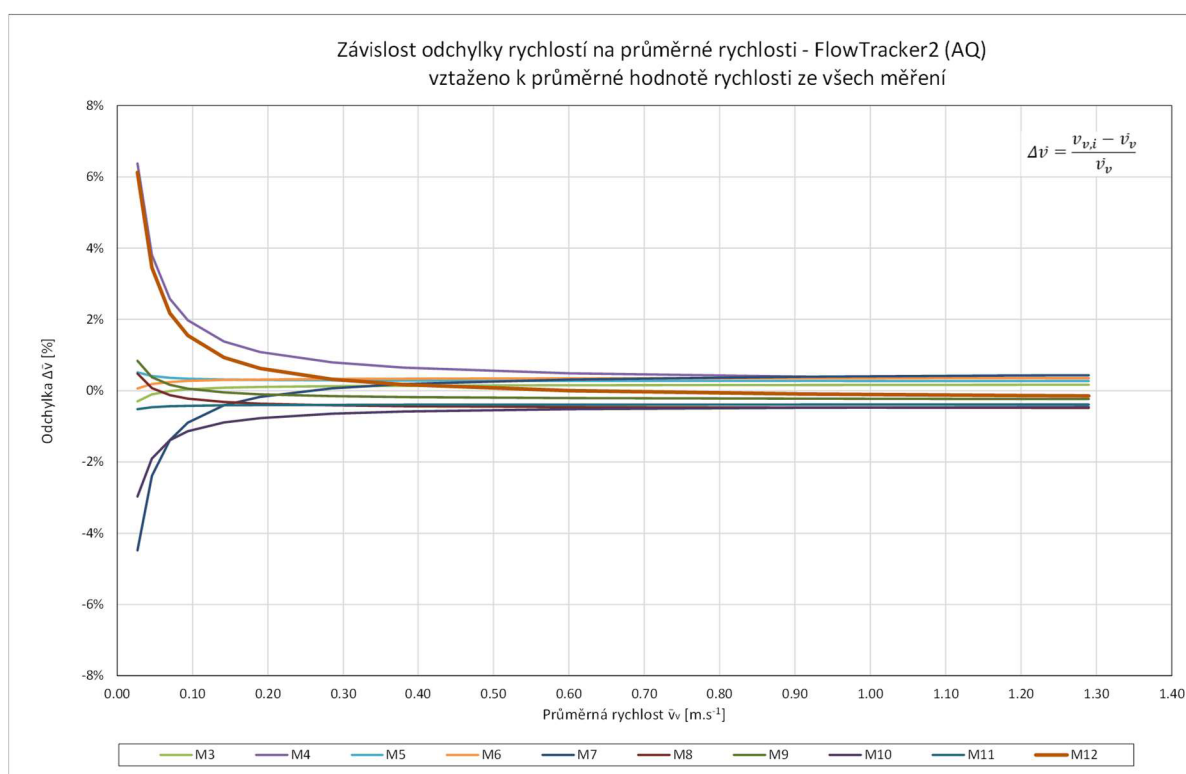
Graf 5.1.2 Časový vývoj relativních odchylek vztažených k třetímu měření



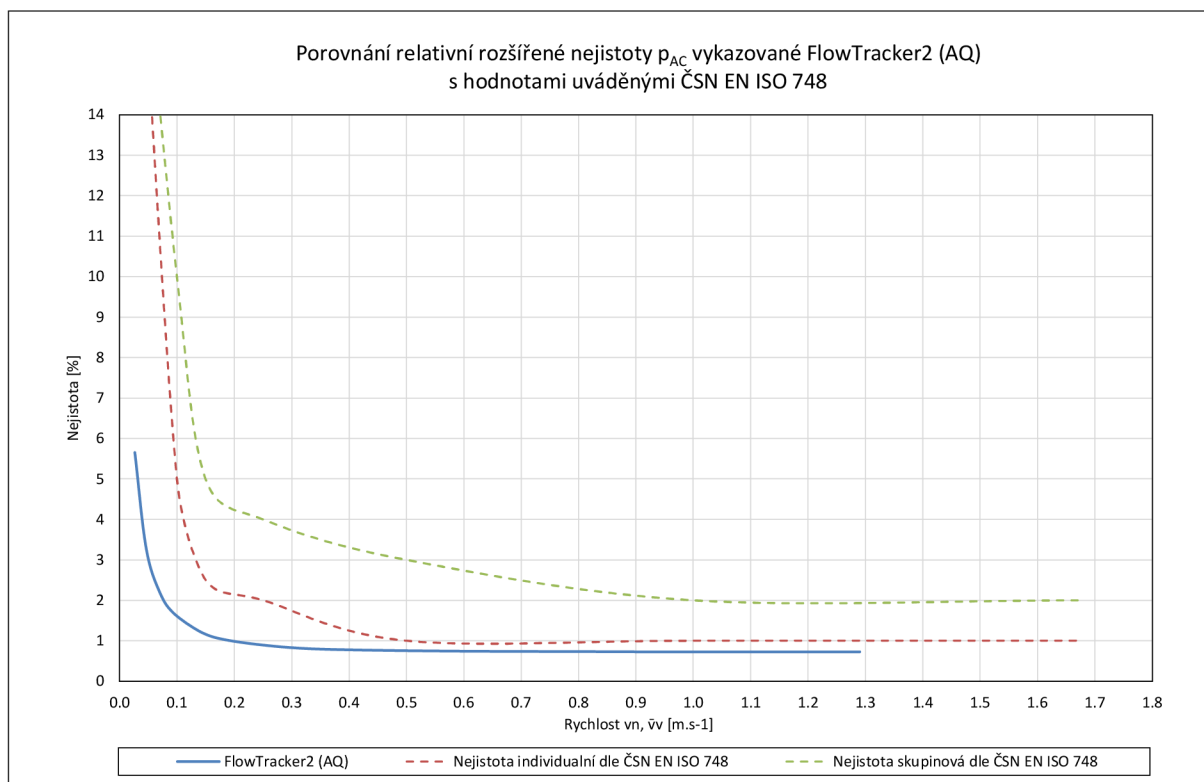
Graf 5.1.3 Závislost odchylky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k průměrné rychlosti ze všech měření

Graf 5.1.3 je obměnou grafu 5.1.1., rozdíl představuje vztažná hodnota rychlosti. Vztažnou úrovní u grafu 5.1.1 je konkrétní hodnota rychlosti měřicím cyklu (M3), v případě grafu 5.1.2 je vztažnou úrovní průměrná hodnota rychlosti ze všech dosavadních měřicích cyklů.

Pro usnadnění porovnání výsledků s např. jinými typy měřidel bodových rychlostí, jako jsou vodoměrné vrtule nebo EMI měřidla, je vhodné hodnoty v grafu vztáhnout místo k otáčkám čerpadla právě k průměrné hodnotě rychlosti stanovené ze všech provedených měřicích cyklů. Graf 5.1.4 je tedy obdobou grafu 5.1.3, na vodorovné ose jsou místo otáček čerpadla vyneseny rychlosti, které odpovídají hodnotám vykazovaným měřidlem FlowTracker2.



Graf 5.1.4 Závislost odchyly rychlostí na průměrné rychlosti vykazované měřidlem – vztaženo k průměrné hodnotě rychlosti ze všech měření



Graf 5.1.5 Porovnání relativní rozšířené nejistoty vykazované posuzovaným UZV měřidlem

Graf 5.1.5 slouží k zobrazení mezilehlé preciznosti měřidla FlowTracker2, současně jsou do grafu pro porovnání přidány i hodnoty platící pro vodoměrné vrtule, resp. EMI měřidla z tab. E.5, normy ČSN EN ISO 748 [7].

Mezilehlá preciznost je zde vyjádřena pomocí hodnot nejistoty p_{Ac} (5.1.1), jelikož s narůstajícím počtem provedených měření se graf 5.1.2 stává stále hustěji zaplněn daty a v důsledku toho se zobrazování relativních odchylek v tomto formátu stává nepřehledným a obtížně interpretovatelným. Relativní nejistota je v tomto případě vyjádřením dvojnásobku variability (směrodatné odchylky) pro každou z 13 úrovní měřených rychlostí.

$$p_{Ac} = 100 \cdot \frac{1}{\bar{v}} \cdot k \cdot S_{v,c} \text{ [%]}; \quad (5.1.1)$$

kde:

p_{Ac} – nejistota;

\bar{v} – průměrná vypočtená rychlost;

k – koeficient rozšíření;

$S_{v,c}$ – Směrodatná odchylka z vypočtených rychlostí.

Analýza samotného grafu 5.1.5 odhaluje velmi dobrou shodu v naměřených hodnotách. Zejména v oblasti nízkých rychlostí (pod 0,3 m/s) vykazuje testované měřidlo výrazně nižší hodnoty nejistoty ve srovnání s limity uvedenými v normě ČSN EN ISO 748 [7] pro vodoměrné vrtule. To naznačuje, že při měření nízkých rychlostí lze v dlouhodobém horizontu očekávat u měřidla lepší shodu mezi opakovanými měřeními. V oblasti vyšších rychlostí se výsledky testovaného měřidla zdají být v souladu s údaji pro vodoměrné vrtule.

5.2 ČASOVÁ VARIABILITA VYKAZOVANÝCH RYCHLOSTÍ

Rozptyl měřených rychlostí UZV měřidla v čase lze analyzovat porovnáním lineárních trendů směrodatné odchylky z 10 čtení na displeji. K tomu je nutné pro každé měření z formuláře na obrázku 4.4.2 zjistit lineární trendy (vystižené parametry c a d), z nichž se pomocí vztahu 5.2.1 vypočte hodnota směrodatné odchylky $S_{v,v}$ pro příslušné otáčky čerpadla.

Jednotlivé lineární trendy vyneseme do jednoho společného grafu 5.2.1 a můžeme tak sledovat rozptýlení hodnot měřených rychlostí vykazovaných UZV měřidly během měřících cyklů.

$$S_{v,v} = n \cdot c + d \text{ [m/s]}; \quad (5.2.1)$$

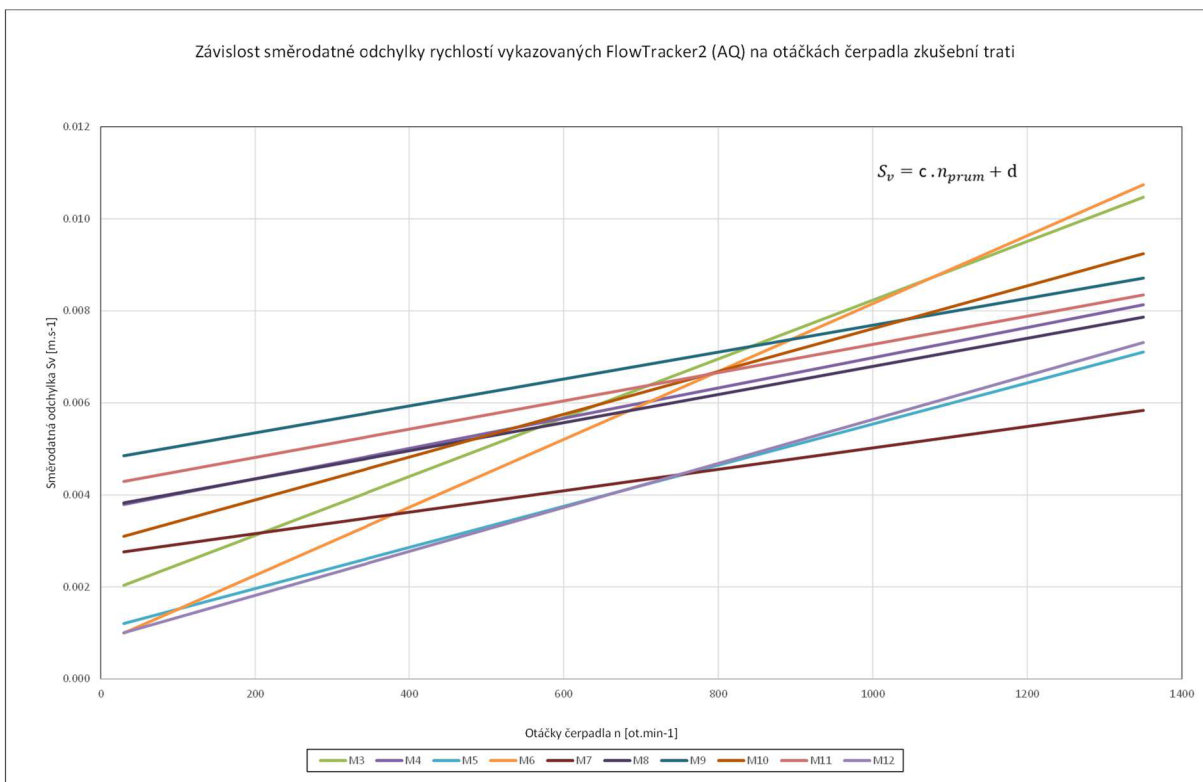
kde:

$S_{v,v}$ – hodnota vypočtené směrodatné odchylky;

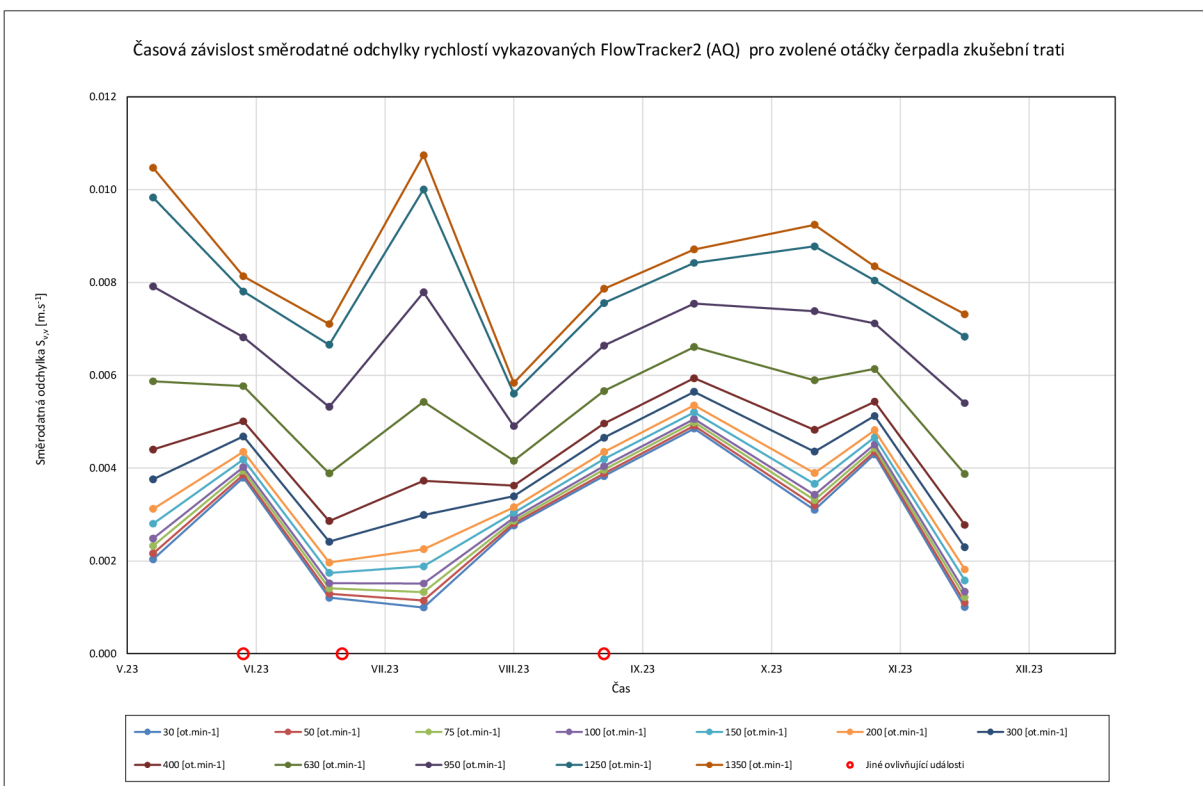
n – hodnota otáček;

c, d – parametry vystihující lineární trendy z jednotlivých měření.

Výsledný graf pak vyjadřuje časový vývoj směrodatné odchylky v závislosti na otáčkách čerpadla zkušební trati viz graf 5.2.2. Tato metoda umožňuje sledovat, jak se rozptyl měřených rychlostí UZV měřidel mění v čase v závislosti na otáčkách čerpadla.



Graf 5.2.1 Závislost směrodatné odchylky rychlostí vykazovaných měřidlem na otáčkách čerpadla zkušební trati



Graf 5.2.2 Časový vývoj variability rychlostí vykazovaných FlowTracker2

5.3 DLOUHODOBÁ STABILITA NÍZKÝCH RYCHLOSTÍ

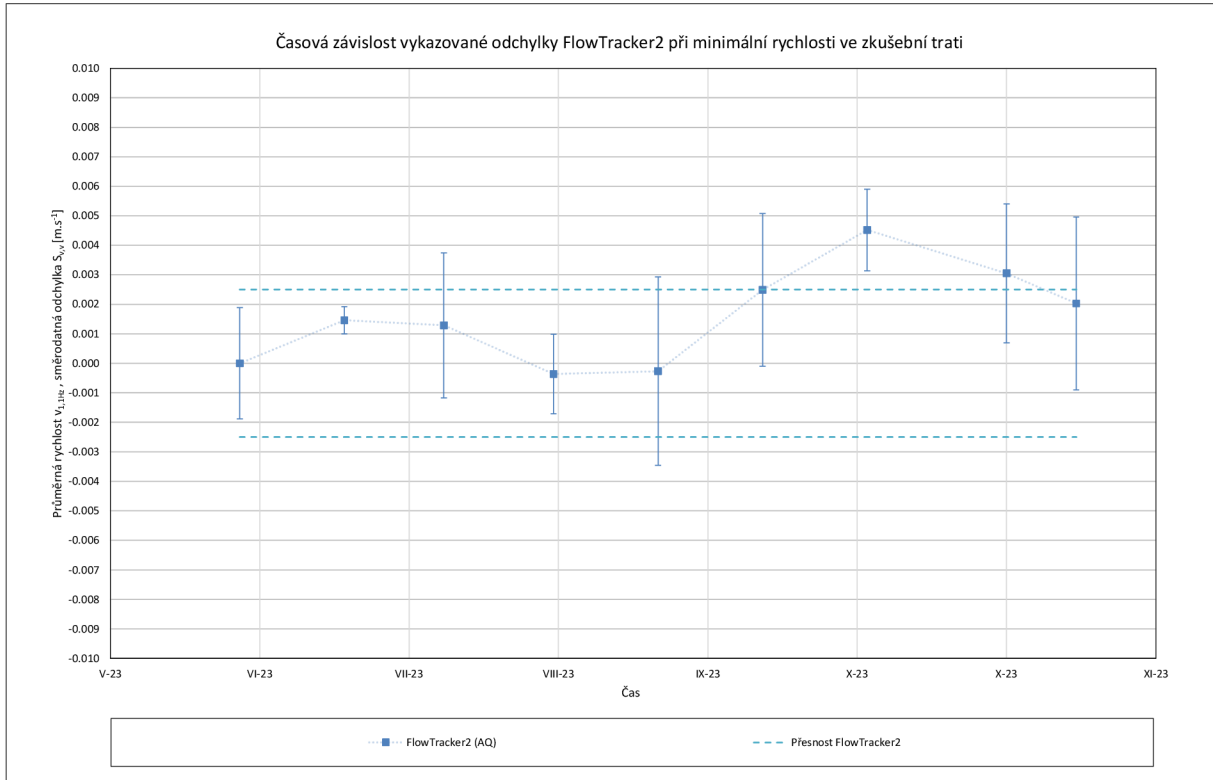
V počáteční fázi vyhodnocování experimentálních prací se pozornost soustředila na sledování stability nulové hodnoty rychlosti. Měřidlo FlowTracker2 nicméně upozorňovalo na řadu chyb vznikajících při měření v důsledku nízké koncentrace částic a nerovnoměrného vyhodnocení rychlostí z jednotlivých bistatických os (Large SNR Variation nebo Low SNR, obě tato chybová hlášení jsou popsána v kapitole 4.4.). Měření v takových podmínkách vždy vykáže extrémní hodnotu chyby měření rychlosti. Z tohoto důvodu bylo opuštěno posouzení měřidla při nulové rychlosti a byla sledována dlouhodobá stabilita při extrémně nízkých rychlostech okolo 0,025 m/s.

Graf 5.3.1 zobrazuje časový vývoj vykazované hodnoty rychlosti pro měřidlo FlowTracker2 při minimální rychlosti vody ve zkušební trati. Prezentované hodnoty jsou vztahy k prvnímu validnímu provedení měření (M3).

Z časového průběhu vykazovaných hodnot je patrná velmi dobrá stabilita rychlostí. Během několika měsíců došlo ke změnám v řádu ± 2 mm/s, přičemž v některých případech byla tato hranice ojediněle překročena. S ohledem na deklarovanou přesnost měřidla FlowTracker2 na úrovni $\pm 2,5$ mm/s lze hodnotit výsledky jako velmi uspokojivé.

Součástí grafického znázornění na grafu 5.3.1 jsou i chybové úsečky reprezentující směrodatnou odchylku stanovenou ve smyslu (4.4.3).

Tato hodnota vyjadřuje míru variability vykazovaných nízkých rychlostí.



Graf 5.3.1 Stabilita měřidla za nízkých rychlostí v čase

6 DOPORUČENÍ K DALŠÍM EXPERIMENTÁLNÍM PRACÍM

Závěry zjištěné v práci v souvislosti s UZV měřidlem FlowTracker2 nelze považovat za konečné, dokud nebudou podpořeny daty z většího počtu měřicích cyklů (delšího sledovaného období). Současné výsledky, prezentované v předložené práci, jsou založeny na relativně malém souboru dat z 12 měřicích cyklů, shromážděných od května 2023 do prosince 2023. Pro komplexnější posouzení měřidel FlowTracker2 je doporučeno provést další výzkum zaměřený na:

- **vliv turbulence proudu:** Analýza vlivu turbulence proudu v podmínkách reálných tratích na hodnoty vykazované rychlosti;
- **chování v reálných podmínkách:** Posouzení chování měřidel při nasazení v reálných podmínkách kanalizačních tratí při průtoku odpadních vod;
- **nadkritické proudění:** Testování měřidel při nadkritickém proudění s rychlostí nad 1,5 m/s;
- **vliv teploty vody:** Prověření vlivu teploty vody na měřená data.

Získané poznatky z těchto oblastí rozšíří chápání fungování UZV měřidla FlowTracker2 a pomohou lépe posoudit jeho spolehlivost a použitelnost v praxi.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou časového vývoje metrologických charakteristik UZV měřidel bodových rychlostí. Výsledky práce přispívají k hlubšímu pochopení vlivu časových faktorů na metrologické vlastnosti těchto měřidel a k optimalizaci jejich použití v praxi. Výstupy experimentálních prací jsou součástí zprávy k závěrečné oponentuře úkolu PRM 2023 č. VIII/9/23[19], jejímž cílem bylo posoudit možnosti využití UZV měřidel rychlostí vodního proudu v oblasti úředního měření průtoku v prizmatických profilech s volnou hladinou.

Předložená bakalářská práce se opírá o teoretické poznatky z oblasti metrologie a teorie měření průtoku, kterým se věnuje kapitola 2. Byly použity relevantní normy a další odborné texty, které se zabývají problematikou měření rychlosti na principu ultrazvuku. V práci jsou uvedeny citace všech použitých zdrojů dle platných norem.

Experimentální práce spočívala v realizaci pravidelných měřicích cyklů vždy po třech týdnech v období celkem 6 měsíců. Získané hodnoty z jednotlivých měřicích cyklů byly zaznamenány do připravených formulářů a následně vyhodnoceny. Výsledky byly prezentovány v podobě grafů a tabulek, které umožňují sledovat časový vývoj metrologických charakteristik a umožnily mimo jiné také srovnání nejistoty FlowTacker2 s normovými hodnotami pro vodoměrné vrtule a EMI měřidla. Popisu experimentálních prací a následné analýze získaných výsledků se věnují kapitoly 4 a 5. Na konci předložené bakalářské práce je uvedeno několik doporučení pro další experimentální práce, jelikož měřicí cykly stále pokračují a vyhodnocování výsledků bude pokračovat i po odevzdání této bakalářské práce.

8 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 772, *Hydrometrická měření - Terminologie*. Touto normou se nahrazuje ČSN EN ISO 772 ze srpna 1998. Praha, 2012.
- [2] *Principy měření průtoku a množství tekutin*. Online. 2016, roč. 2016, č. 02. Praha, ČVUT: Automa – časopis pro automatizační techniku, 2016. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/principymereni-prutoku-a-mnozstvi-tekutin-2002_02_28336_320/. [cit. 2024-05-06].
- [3] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 18365, *Hydrometrie- Výběr, zřízení a provoz vodoměrných stanic*. Zář 2014. Praha, 2014.
- [4] ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. 6. *LASEROVÁ ANEMOMETRIE*. Online. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0600.htm>. [cit. 2024-04-28].
- [5] ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. Metrologický předpis MP 010, *MP 010 Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou postup pro provádění úředního měření metodou rychlostního pole, objemovou metodou, vážicí metodou, přenosnou sestavou s průtokoměrem, měrnými přelivy a žlaby*. Únor 2023. Brno.
- [6] SUCHÁNEK, Michal; ŽOUŽELA, Michal; STRÁNSKÝ, David a SÝKORA, Petr. *Monitoring v městském odvodnění Část II. - Měření úrovně hladiny a průtoků*. SOVAK ČR, 2024. ISBN 978-80-907303-5-9.
- [7] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 748, *Hydrometrie-Měření průtoku kapalin v otevřených korytech - Metody rychlostního pole s použitím měření bodové rychlosti*. Březen 2023. 2023.
- [8] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 3455, *Hydrometrie - Kalibrace měřidel rychlosti proudění vody v přímých otevřených nádržích*. 2.vydání. Praha, 2023.
- [9] ĎAĎO, Stanislav; BEJČEK, Ludvík a PLÁTIL, Antonín. *Měření průtoku a výšky hladin*. Praha: Technická literatura BEN, 2005. ISBN 80-7300-156-X.

- [10] SONTEK, a Xylem brand. Argonaut-ADV® ULTRA-PRECISE 3-D VELOCITY MEASUREMENT. Online. 2021, s. 2. Dostupné z: <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Brochures%20and%20Catalogs/argonaut-adv-brochure.pdf>. [cit. 2024-04-28].
- [11] ARGONAUT-ADV: ROBUST VELOCITY MEASUREMENTS IN A COMPACT, EASY-TO-USE PACKAGE. Online. In: GEO-MATCHING. 2024. Dostupné z: <https://cdn.geo-matching.com/kpbXADR3.jpg?w=640&s=fb05d426e64ad6976d9065b01b9b0ece>. [cit. 2024-04-28].
- [12] SONTEK, a xylem brand. *Acoustic Doppler Velocimeters (ADV^s®): ULTRA-PRECISE 3-D VELOCITY MEASUREMENT*. 2017. Dostupné také z: <https://www.xylem.com/siteassets/brand/sontek/resources/brochure/sontek-acoustic-doppler-velocimeters-2017.pdf>.
- [13] NORTEK AS. *The comprehensive manual for velocimeters*. 2018. Dostupné také z: https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-030-Comprehensive-Manual-Velocimeters_1118.pdf.
- [14] *Vector - 300 m: Single Point Velocimeter for Shallow Waters*. Online. In: GEO-MATCHING. 2024. Dostupné z: <https://cdn.geo-matching.com/yodXqYoe.jpg?w=640&s=a6580246e197785b2cf2fac0eb71c7d9>. [cit. 2024-04-28].
- [15] NORTEK GROUP. *Sample 3D velocity at up to 200 Hz for use in hydraulic models and laboratory flumes: VELOCIMETER Vectrino*. Dostupné také z: https://www.prager-elektronik.at/wp-content/uploads/2017/01/katalog_kategorie_stroemung_stroemungsmessung_ultraschallprinzip_vectrino-2.pdf.
- [16] *FlowTracker*. Online. AQUAmonitoring. 2012. Dostupné z: <http://www.aquamonitoring.cz/produkty/products/show/?categoryId=53&itemId=48>. [cit. 2024-04-28].
- [17] SONTEK – A XYLEM BRAND. *FlowTracker2 User's Manual*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019. Dostupné z: <https://www.ysi.com/flowtracker2>. [cit. 2024-05-07].

- [18] *FlowTracker2 Brochure: FlowTracker2 WADING DISCHARGE MEASUREMENT INSTRUMENT*. Online. In: . 2016. Dostupné z: https://ekotechnika.cz/sites/default/files/pdf/am_flowtracker2_brochure_03_2016.pdf. [cit. 2024-05-08].
- [19] ŽOUŽELA, Ing. Michal; ZUBÍK, Ing. Pavel; KHAINOVÁ, Renata a ORSÁG, Pavel. *Posouzení použitelnosti měřidel využívajících ultrazvukový princip pro měření rychlosti vodního proudu: Zpráva k závěrečné oponentuře úkolu PRM 2023 č. VIII/9/23*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2023.
- [20] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost. o.s, 2008.
- [21] *Magnetický indukční přístroj na měření proudění k měření odtoku OTT MF pro*. Online. In: HYDROMETRICS s.r.o. 2017. Dostupné z: <http://www.hydrometrics.cz/main-navigation/ott-produkty/prutok-173/ott-mf-pro-485/>. [cit. 2024-05-22].
- [22] *Univerzální měřicí křídlo pro měření odtoku OTT C31*. Online. In: HYDROMETRICS s.r.o. 2017. Dostupné z: <http://www.hydrometrics.cz/main-navigation/ott-produkty/prutok-173/ott-c31-486/>. [cit. 2024-05-22].
- [23] *FlowTracker2 Handheld-ADV*. Online. In: Pnt HYDRO. 2007. Dostupné z: https://www.pnt-hydro.com/images/stories/Products/Sontek/ADV/adv-beam-setup_10MHz.png. [cit. 2024-05-14].

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2.4.1 Vodoměrná vrtule propelerového typu [22].....	17
Obrázek 2.4.2 Vyhodnocovací jednotka (vlevo) a sonda (vpravo) EMI měřidla [21].....	17
Obrázek 2.5.1 Argonaut-ADV [11].....	20
Obrázek 2.5.2 Nortek Vector [14].....	21
Obrázek 2.4.1 FlowTracker2 [17].....	23
Obrázek 2.4.2 Sonda FlowTrackeru2 ve 2D a 3D variantě [17].....	23
Obrázek 2.4.3 Pozice a velikost měřeného objemu u 3D varianty [23].....	24
Obrázek 2.4.4 Technické specifikace měřidla FlowTracker2[18].....	25
Obrázek 4.2.1 Schéma zkušební trati [19].....	28
Obrázek 4.4.1 Chybová hlášení (červeně) zobrazena na vyhodnocovací jednotce.....	31
Obrázek 4.4.2 Instalace sondy měřidla FlowtTracker2 v druhém měrném prostoru zkušební trati.....	33
Obrázek 4.4.3 Pohled na vyhodnocovací jednotku a 2.měrný prostor zkušební trati.....	34
Obrázek 4.4.4 Formulář měření.....	35
Graf 5.1.1 Závislost odchylky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k rychlosti z třetího měření.....	37
Graf 5.1.2 Časový vývoj relativních odchylek vztažených k třetímu měření.....	39
Graf 5.1.3 Závislost odchylky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k průměrné rychlosti ze všech měření.....	39
Graf 5.1.4 Závislost odchylky rychlostí na průměrné rychlosti vykazované měřidlem – vztaženo k průměrné hodnotě rychlosti ze všech měření.....	40
.....	41
Graf 5.1.5 Porovnání relativní rozšířené nejistoty vykazované posuzovaným UZV měřidlem.....	41
Graf 5.2.2 Časový vývoj variability rychlostí vykazovaných FlowTracker2.....	43
Graf 5.3.1 Stabilita měřidla za nízkých rychlostí v čase.....	45

10 SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Graf závislosti odchylky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k rychlosti z třetího měření
- P2 Časový vývoj relativních odchylek vztažených k třetímu měření
- P3 Graf závislosti odchylky rychlostí na průměrné rychlosti vykazované měřidlem – vztaženo k průměrné hodnotě rychlosti ze všech měření
- P4 Graf závislosti odchylky rychlostí na otáčkách oběhového čerpadla – vztaženo k průměrné rychlosti ze všech měření
- P5 Porovnání relativní rozšířené nejistoty vykazované posuzovaným UZV měřidlem
- P6 Závislost směrodatné odchylky rychlostí vykazovaných měřidlem na otáčkách čerpadla zkušební trati
- P7 Časový vývoj variability rychlostí vykazovaných FlowTracker2
- P8 Stabilita měřidla za nízkých rychlostí v čase