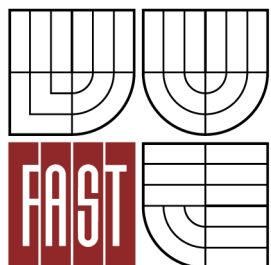




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# VYUŽITÍ INTEGRAČNÍ METODY PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU ZA NEROVNOMĚRNÉHO PROUDĚNÍ V PROSTORU KONFUZORU MĚRNÉHO ŽLABU

USE OF INTEGRATION METHODS FOR DISCHARGE MEASUREMENT IN NON-UNIFORM FLOW  
IN CONFUSOR OF THE FLUME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Pavel Zeiner

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Pavel Zeiner

**Název** Využití integrační metody pro měření průtoku  
za nerovnoměrného proudění v prostoru  
konfuzoru měrného žlabu

**Vedoucí bakalářské práce** Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

**Datum zadání  
bakalářské práce** 30. 11. 2012

**Datum odevzdání  
bakalářské práce** 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

.....  
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

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

## **Podklady a literatura**

- [1] ČSN ISO 1438/1. Měření průtoků vody v otevřených korytech pomocí přelivů a Venturiho žlabů, Část 1 - Tenkostěnné přelivy, září 1997
- [2] ČSN ISO 9826. Měření průtoků kapalin v otevřených korytech, Parshallovy žlaby a žlaby typu Saniiri, červen 1994
- [3] Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968
- [4] Žoužela, M., Šulc, J. TNV 25 9305 – Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou. Hydroprojekt CZ a.s., Praha. Odvětvová technická norma vodního hospodářství. 2012

## **Zásady pro vypracování**

Pro měření průtoků v profilech s volnou hladinou jsou velmi často využívány vzdouvací objekty typu žlab. Jedním z nejpoužívanějších je žlab Parshallův. Tento žlab je v mnoha případech instalován ve stísněných poměrech a jedinou možností jak nezávisle stanovit jím protékající průtok při jeho kalibraci, je provést hydrometrování v zužující se části žlabu – v konfuzoru. V tomto prostoru však vzniká nerovnoměrné proudění a současně je ustálenost průtoků z mnoha technologických důvodů zajištěna pouze po dobu několika minut. Jistým řešením rychlého a relativně přesného stanovení průtoků nezávislou metodou je využití integračního postupu, kdy je vodoměrná vrtule rovnoměrně přesouvána po ploše průtočného průřezu.

V rámci zpracování bakalářské práce posluchač nalezne v prostoru konfuzoru měrného žlabu vhodný profil pro aplikaci integrační metody a posoudí možnost jejího praktického využití.

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Michal Žoužela, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření průtočného množství v měrném žlabu typu PARS P3. Nejdříve dochází k hledání vhodného profilu v prostoru konfuzoru pro výzkum a následně pak k sestrojení grafické závislosti, z níž lze vyčíst hodnoty opravného koeficientu pro celou řadu průtoků v měrném žlabu.

## **Klíčová slova**

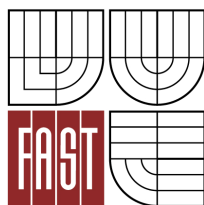
Měrný žlab, měření průtoků, bodová rychlost, integrační metoda, nerovnoměrné proudění, opravný koeficient.

## **Abstract**

This thesis deals with the measurement of flow rate in flume type PARS P3. First, there is a search for a convenient profile in confusor for research and consequently to construct graphical dependence from which to read the value of the correction coefficient for many flow rates in flume.

## **Keywords**

Flume, flow measurement, spot speed, integration method, non-uniform flow, corrective coefficient.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vedoucí práce</b>                    | Ing. Michal Žoužela, Ph.D.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Autor práce</b>                      | Pavel Zeiner                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Škola</b>                            | Vysoké učení technické v Brně                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Fakulta</b>                          | Stavební                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Ústav</b>                            | Ústav vodních staveb                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Studijní obor</b>                    | 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Studijní program</b>                 | B3607 Stavební inženýrství                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Název práce</b>                      | Využití integrační metody pro měření průtoku za nerovnoměrného proudění v prostoru konfuzoru měrného žlabu                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Název práce v anglickém jazyce</b>   | Use of integration methods for discharge measurement in non-uniform flow in confusor of the flume                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Typ práce</b>                        | Bakalářská práce                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Přidělovaný titul</b>                | Bc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Jazyk práce</b>                      | Čeština                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Datový formát elektronické verze</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Anotace práce</b>                    | Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření průtočného množství v měrném žlabu typu PARS P3. Nejdříve dochází k hledání vhodného profilu v prostoru konfuzoru pro výzkum a následně pak k sestrojení grafické závislosti, z níž lze vyčíst hodnoty opravného koeficientu pro celou řadu průtoků v měrném žlabu. |
| <b>Anotace práce ENG</b>                | This thesis deals with the measurement of flow rate in flume type PARS P3. First, there is a search for a convenient profile in confusor for research and consequently to construct graphical dependence from which to read the value of the correction coefficient for many flow rates in flume.                        |
| <b>Klíčová slova</b>                    | měrný žlab, měření průtoku, bodová rychlost, integrační metoda, nerovnoměrné proudění, opravný koeficient                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Klíčová slova ENG</b>                | flume, flow measurement, spot speed, integration method, non-uniform flow, corrective coefficient                                                                                                                                                                                                                        |

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

ZEINER, Pavel. *Využití integrační metody pro měření průtoku za nerovnoměrného proudění v prostoru konfuzoru měrného žlabu*. Brno, 2013. 42 s., 26 s. příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D..

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Žoužely, Ph.D. a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24.5.2013

.....  
podpis autora  
Pavel Zeiner

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D. za podporu při měření a především vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za odborné vedení, poskytnuté rady, informace a pomoc při zpracování této bakalářské práce.

Současně děkuji Ing. Marii Fejfarové a Ing. Ladislavu Roušarovi za pomoc při měření v laboratoři.

## Obsah

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Seznam symbolů a označení .....                                 | 8  |
| 1. Úvod .....                                                   | 9  |
| 2. Metody měření průtoků v profilech s volnou hladinou .....    | 10 |
| 2.1. Metoda Q/H charakteristiky .....                           | 10 |
| 2.1.1. Měrné přelivy .....                                      | 11 |
| 2.1.2. Měrné žlaby .....                                        | 12 |
| 2.2. Metoda kontinuitní .....                                   | 13 |
| 3. Parshallovy žlaby .....                                      | 14 |
| 3.1. Měrný žlab PARS P3 .....                                   | 15 |
| 4. Plošná integrační metoda .....                               | 18 |
| 4.1. Opravný koeficient k .....                                 | 20 |
| 5. Cíle a motivace práce .....                                  | 21 |
| 6. Experimentální část .....                                    | 22 |
| 6.1. Měřicí trať a technika .....                               | 22 |
| 6.1.1. Popis měřicí trati .....                                 | 22 |
| 6.1.2. Popis použité techniky .....                             | 24 |
| 6.2. Postup měření .....                                        | 30 |
| 6.2.1. Okrajové podmínky při měření .....                       | 31 |
| 6.3. Zpracování dat a prezentace výsledků .....                 | 32 |
| 6.3.1. Hledání vhodného profilu v konfuzoru měrného žlabu ..... | 32 |
| 6.3.2. Stanovení opravného koeficientu k .....                  | 33 |
| 6.3.3. Stanovení doby pojezdu vodoměrné vrtule .....            | 35 |
| 6.4. Diskuze dosažených výsledků .....                          | 36 |
| 7. Doporučení pro navazující výzkumné práce .....               | 37 |
| 8. Závěr .....                                                  | 38 |
| 9. Literatura .....                                             | 40 |
| Seznam použitých vztahů pro zpracování dat .....                | 41 |
| Seznam příloh .....                                             | 42 |

## Seznam symbolů a označení

| Označení   | Popis                                         | Jednotka                                               |
|------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\alpha$   | kalibrační konstanta vodoměrné vrtule         | -                                                      |
| $\beta$    | kalibrační konstanta vodoměrné vrtule         | -                                                      |
| $a$        | koeficient vystihující funkční závislost      | -                                                      |
| $b$        | koeficient vystihující funkční závislost      | -                                                      |
| $b$        | šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu | [m]                                                    |
| $A$        | koeficient vystihující funkční závislost      | -                                                      |
| $B$        | koeficient vystihující funkční závislost      | -                                                      |
| $C$        | koeficient vystihující funkční závislost      | [m]                                                    |
| $D$        | koeficient vystihující funkční závislost      | [l.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $f$        | frekvence otáček vodoměrné vrtule             | [s <sup>-1</sup> ]                                     |
| $h$        | výška přepadového paprsku                     | [m]                                                    |
| $h$        | výška svislicového nebo mezisvislicového pásu | [m]                                                    |
| $H$        | hloubka proudu v místě hydrometrování         | [m]                                                    |
| $k$        | opravný koeficient                            | -                                                      |
| $m$        | počet svislicových nebo mezisvislicových pásů | -                                                      |
| $n$        | počet impulsů vodoměrné vrtule                | -                                                      |
| $Q$        | průtočné množství                             | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> , l.s <sup>-1</sup> ] |
| $Q_{pož}$  | požadovaný průtok měrným žlabem               | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> , l.s <sup>-1</sup> ] |
| $Q_{skut}$ | skutečný průtok měrným žlabem                 | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> , l.s <sup>-1</sup> ] |
| $R$        | hydraulický poloměr                           | [m]                                                    |
| $S$        | průtočná plocha profilu                       | [m <sup>2</sup> ]                                      |
| $\bar{S}$  | šířka měrného žlabu v místě hydrometrování    | [m]                                                    |
| $t$        | doba měření                                   | [s]                                                    |
| $u$        | bodová rychlost proudu                        | [m.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $u_{měř}$  | rychlost vykazovaná měřicím systémem          | [m.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $v$        | průřezová rychlost                            | [m.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $\bar{v}$  | průměrná rychlost na svislici                 | [m.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $v_{prf}$  | profilová rychlost                            | [m.s <sup>-1</sup> ]                                   |
| $y_k$      | kritická hloubka                              | [m]                                                    |

## 1. Úvod

V posledních letech se v souvislosti s měnící se legislativou neustále zvyšují požadavky na přesnost měřicích systémů a s tím související stanovení okamžitých průtoků a proteklých objemů. S touto problematikou se setkáváme nejen v oblasti vodního hospodářství, ale i v zemědělství a celé řadě průmyslových odvětví, jako jsou např. hydraulické okruhy na ČOV, odtoky z výrobních areálů nebo umělé prizmatické kanály. Pro měření proteklého objemu vody v systémech s volnou hladinou se velmi často používají napevno instalované měřicí systémy. Mezi nejpoužívanější z nich se řadí vzdouvací objekty typu žlab. Jedním z nich je žlab Parshallův.

Měrné žlaby tvoří měřicí systémy, které jsou v mnoha případech instalovány v těžko přístupných a stísněných poměrech, a jedinou možností, jak zkontrolovat jimi protékající průtok, je využít metodu hydrometrování pomocí vodoměrné vrtule. V mnoha případech jsou žlaby umístěny v šachtách, jak je dobře patrné na Obr. 1.1, nebo v místech bez realizace dostatečně dimenzovaného přítokového a odpadního koryta, které jsou nezbytnou součástí měřicích systémů. Vzhledem k těmto špatným podmínkám, nám ve většině případů kontroly správného měření měrným žlabem nezbyvá nic jiného, než provést měření ve zužující se části žlabu – v konfuzoru. V tomto prostoru však vzniká nerovnoměrné proudění a současně je ustálenost průtoků z mnoha technologických důvodů zajištěna pouze na krátkou dobu (několik minut). Poměrně rychlým a relativně přesným způsobem, jak stanovit průtok, je využití integračního postupu, jenž je detailněji popsán v kapitole 4.



Obr. 1.1 Ukázky způsobu umístění měrných žlabů v šachtách

Předkládaná bakalářská práce se opírá o měření, která probíhala na jedné z měrných tratí v budově F Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební

Vysokého učení technického v Brně. V rámci experimentální části je nejprve v prostoru konfuzoru měrného žlabu nalezen vhodný profil pro aplikaci integrační metody a následně posouzena možnost jejího praktického využití.

Práce je rozdělena na teoretickou část (kapitoly 2., 3. a 4.) a experimentální část. V teoretické části je detailně popsán žlab typu PARS P3 (geometricky podobný Parshallovu žlabu) a problematika měření průtoku na měrných žlabech. Dále je zde popsán proces hydrometrování a plošná integrační metoda, které se celý výzkum především týká.

V praktické části nejdříve nalezneme výčet použité techniky, popis měrné trati a jednotlivých metod měření včetně podmínek simulovaných v laboratoři při měření. Následuje shrnutí a prezentace výsledků. Součástí práce je celá řada tabelárních výstupů pro přehled naměřených a vyhodnocených dat jednotlivých metod.

Výzkum byl realizován na jaře roku 2012 pod dohledem Ing. Michala Žoužely, Ph.D. Výzkum přináší nové poznatky v souvislosti s hydrometrováním v prostoru konfuzoru měrného žlabu, konkrétně žlabu typu PARS P3<sup>1</sup>.

## **2. Metody měření průtoků v profilech s volnou hladinou**

Ve smyslu [7] bude v této kapitole čtenář seznámen s metodami stanovení průtoku a proteklých objemů a jejich základní charakteristikou. Měřidla instalovaná v profilech s volnou hladinou využívají především dvou odlišných přístupů. Jsou jimi metoda kontinuitní a metoda Q/H charakteristiky, kdy jsou pro měření používány mimo jiné dva základní vzdouvací prvky – měrné žlaby a měrné přelivy.

### **2.1. Metoda Q/H charakteristiky**

Tato metoda je ve smyslu [9] jednou ze základních při stanovení průtoku. Z hlediska provozního představuje poměrně spolehlivý přístup, protože je měřena pouze jedna veličina, kterou je výška přepadového paprsku  $h$ , resp. hloubka vody  $H$  v daném profilu. K měření hloubky většinou dochází v místech, kde vzniká kritická hloubka  $y_k$  (přechod z říčního proudění do proudění bystřinného). Takto vzniklé proudové poměry lze využít pro stanovení aktuálního průtoku. Průtok je tedy dán jednoznačnou funkční závislostí na úrovni hladiny protiproudě před vzdouvacím objektem.

---

<sup>1</sup> Žlaby typu PARS, jež jsou dodávány společností Pars aqua s.r.o., jsou komerční verzí vycházející z normalizovaných Parshallových žlabů [1].

### 2.1.1. Měrné přelivy

Měření za pomoci měrných přelivů, jak je blíže specifikováno v [9], je v praxi využíváno pro svoji jednoduchost a nízkou zranitelnost měřicího systému. Obvykle jsou využívány pro měření relativně čistých vod, kdy nedochází v prostoru před vzdouvací konstrukcí k usazování sedimentů. Nejčastěji bývají zhotoveny z nerezového ocelového plechu, který je upevněn do betonových stěn kanálu, méně potom z plastické hmoty. Výpočet průtoku probíhá ve smyslu vztahu:

$$Q = A(h + C)^B + D, \quad (2.1)$$

kde

$Q$  – hledaný průtok,

$h$  – výška přepadového paprsku,

$A, B, C, D$  – koeficienty vystihující funkční závislost, které závisí na použitém měrném přelivu, geometrických a proudových okrajových podmínkách.

Z mnoha typů přelivů jsou nejčastěji využívány přelivy tzv. ostrohranné (Obr. 2.1), kdy je jasné definováno místo odtržení přepadového paprsku a zároveň je zajištěno zavzdušnění spodního líce přepadového paprsku tak, aby nedocházelo k výskytu pulzací proudu vzhledem k rozdílným tlakům nad a pod přepadovým paprskem.

K nejznámějším ostrohranným přelivům se řadí:

- přelivy s pravouhlým výřezem,
- přelivy s lichoběžníkovým výřezem,
- přelivy s výřezem ve tvaru V,
- přelivy speciální složené.

Volba typu přelivu je závislá na geometrických a proudových poměrech v místě instalace, variačním rozsahu měřených průtoků a požadované přesnosti.



*Obr. 2.1 Ostrohranné přelivy s pravoúhlým, lichoběžníkovým, trojúhelníkovým a kombinovaným výřezem*

### 2.1.2. Měrné žlaby

Měrné žlaby jsou měřicí systémy, které se napevno instalují do profilů s volnou hladinou. Jsou to takové vestavby, jež zužují profil do té míry, že proudění je nuceno přejít z říčního do bystřinného. Toho se docílí realizací tzv. hrdla. Absence omezení průtoku vody u dna v místě vlastního měrného žlabu je základní odlišností od měrných přelivů. Jejich měřitelné rozpětí je řádově od desetin l/s až po několik m<sup>3</sup>/s, čemuž odpovídají šířky hrdel pohybující se od cm až do jednotek metrů. Pro stanovení průtoku se u měrných žlabů analogicky ve smyslu rovnice (2.1) používá vyjádření:

$$Q = A(H + C)^B + D, \quad (2.2)$$

kde

$Q$  – hledaný průtok,

$H$  – hloubka vody v příslušném měrném profilu,

$A, B, C, D$  – koeficienty vystihující funkční závislost.

Jako jedny z nejpoužívanějších měrných žlabů využívajících  $Q/H$  charakteristiku jsou Parshallovy žlaby a žlaby typu Venturi (Obr. 2.2).



Obr. 2.2 Protiproudňí pohled na Venturiho řlab a poproudňí pohled na řlab typu PARS

Vzhledem k tomu, ře byl výzkum prováděn na Parshallově řlabu, dovoluji si tento typ měřného řlabu popsat detailněji v kapitole 3.

## 2.2. Metoda kontinuitní

Jedná se o stanovení průtočného množství metodou vycházející z rovnice kontinuity. Využití principu spojitosti proudu v profilech s volnou hladinou, jak uvádí [7], spočívá v měření dvou samostatných, zpravidla nezávislých veličin, což může představovat méně spolehlivější přístup než metoda Q/H charakteristiky, kdy byla měřena pouze jedna veličina. Těmito veličinami jsou hloubka  $H$  a rychlost  $u_{měř}$ . Ze známého rozměru měřného profilu, kterým zpravidla bývá šířka  $b$ , a měřené hloubky  $H$  se stanoví průtočná plocha  $S$ , která je ve funkční závislosti k hloubce  $H$ . Přenásobením takto stanovené plochy průřezovou rychlostí  $v$ , získanou násobením rychlosti  $u_{měř}$  a opravného koeficientu  $k$ , získáme hledaný průtok ve smyslu rovnice:

$$Q = k \cdot u_{měř} \cdot S = v \cdot S, \quad (2.3)$$

kde

$Q$  – hledaný průtok,

$u_{měř}$  – rychlost vykazovaná měřicím systémem,

$v$  – průřezová rychlost,

$S$  – průtočná plocha průřezu ( $S=f(H)$ ),

$k$  – opravný koeficient, jehož hodnota je závislá na proudových a geometrických okrajových podmínkách měřného profilu.

V praxi může být kontinuální metoda poměrně náchylná na přesnost, a to v případě kdy v měrném profilu dochází k deformacím rychlostního pole, které bývají zpravidla způsobeny nesplněnými požadavky na rozměry a tvar přítokového koryta. Opravný koeficient, jehož hodnoty zjišťujeme kalibrací, do jisté míry může tyto deformace zohlednit.

### 3. Parshallovy žlaby

V této kapitole je objasněna problematika měrných žlabů Parshallova typu, jejich využití v praxi, dále nalezneme charakteristiku tvaru a popis jednotlivých částí žlabu a výčet základních vlastností a výhod, díky kterým se dnes tyto žlaby řadí mezi natolik využívaná měřidla v profilech s volnou hladinou.

Měrné žlaby jsou vzdouvací objekty, ve kterých je přitékající voda nucena přejít z proudění podkritického do proudění nadkritického. U Parshallových žlabů je to způsobeno místním zúžením koryta a následným zvýšeným spádem ve dně.

Jak je uvedeno v [7], konstrukce žlabu musí být pevná, vodotěsná a schopná odolávat velkým vodám a změnám teplot, aniž by došlo k jejímu poškození. Materiál musí být odolný vůči znečištění dopravovaném vodou protékající měrným profilem. V převážné většině případů jsou měrné žlaby instalovány na místech, kudy protéká voda vykazující fyzikální a chemické vlastnosti odpovídající běžné městské nebo říční vodě. Ve výjimečných případech jsou vzdouvací objekty vystaveny vysokým teplotám a agresivním chemickým účinkům, jako to může být například u výtoků z chladírenských, chemických či jiných specifických provozů.

Parshallovy žlaby, jak popisuje [1], mají pravoúhlý příčný průřez a skládají se ze zužující se vtokové části, hrdla a rozšiřující se části výtokové (Obr. 3.1). Dno ve vtokové části musí být jak v podélném, tak v příčném směru vodorovné. Boční stěny jsou svislé a jejich roviny svírají s osou žlabu konstantní úhel  $10^{\circ}19'$ , resp. půdorysné zúžení 1:5 vzhledem k podélné svislé rovině žlabu. Boční stěny hrdla jsou v půdoryse rovnoběžné. Dno musí být skloněno směrem po proudu ve sklonu 3:8, což platí pro žlaby všech velikostí. Boční stěny výtokové části musí být svislé a jejich roviny musí svírat s osou žlabu konstantní úhel  $9^{\circ}28'$  nebo musí mít půdorysné rozšíření 1:6 vzhledem k ose žlabu. Dno je skloněno směrem proti proudu ve sklonu 1:6, což platí pro žlaby všech velikostí. Geometricky si však žlaby různých velikostí podobné nejsou.



*Obr. 3.1 Pohled na žlab (zleva nátoková část, hrdlo a výtoková část)*

Měrný Parshallův žlab se používá především na lokalitách s vyrovnaným rozsahem průtoků, na potocích, odvodňovacích či zavlažovacích kanálech, na výustích z kanalizací, na čistírnách odpadních vod apod.

Výrobce a dodavatel měrných žlabů PARS uvádí několik výhod. Ve smyslu [6] patří mezi tyto výhody, díky kterým je zajištěna široká použitelnost žlabů, dlouhá životnost, vysoký rozsah měřených průtoků, možnost měření i při značném zatopení hrdla od dolní vody, relativní necitlivost na rozdělení přítokové rychlosti v kanále. Dále nelze opomenout, že rychlost ve žlabu je dostatečná, a tudíž nedochází k sedimentaci látek. Žlab je také schopen bez problému převádět hrdlem sunuté nerozpuštěné látky, což souvisí s minimálními nároky na údržbu. Materiál měrných žlabů vykazuje patřičnou odolnost z důvodu využívání pro městské odpadní vody, vody s agresivními chemickými účinky apod.

### **3.1 Měrný žlab PARS P3**

Inženýrsko-dodavatelská společnost Pars aqua s.r.o. se sídlem v Praze nabízí mimo jiné stabilní průtokoměry vod pro kanalizace, potoky a jiná otevřená koryta. Mezi tyto produkty se řadí také měrné žlaby, které jsou společností označovány jako žlaby typu PARS. Jsou nabízeny v celé řadě velikostí (P1 – P9).

Vzhledem k tomu, že se experimentální část práce zabývala měřením na žlabu typu PARS P3<sup>2</sup>, jehož schéma je vyobrazeno na Obr. 3.2, budeme se jím v následující kapitole podrobněji zabývat. Materiálem žlabu je polypropylen. Průtočné množství lze určit z rovnice, kterou udává výrobce:

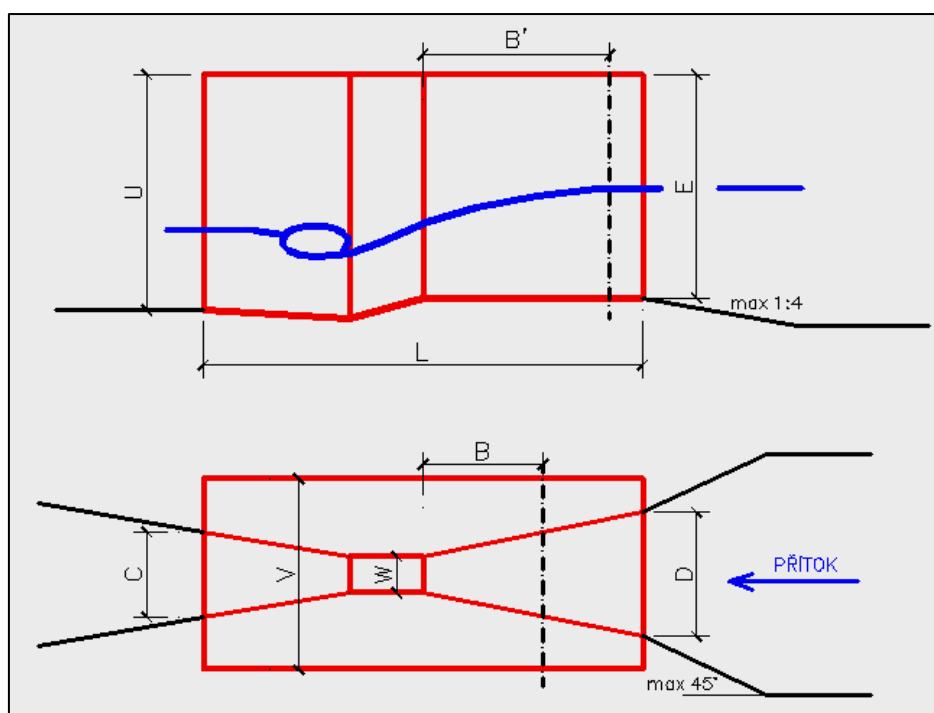
$$Q = a \cdot H^b = 0,1784 \cdot H^{1,555}, \quad (3.1)$$

kde

$Q$  – hledaný průtok,

$H$  – hloubka vody (měřená v místě, které udává výrobce),

$a, b$  – koeficienty vystihující funkční závislost mocninné funkce.



Obr. 3.2 Schéma žlabu PARS P3 včetně základních rozměrů

<sup>2</sup> Žlab Pars P3 byl zapůjčen k výzkumným pracím majitelem firmy Pars aqua s.r.o. Ing. Janem Vršeckým, CSc.

V následující tabulce jsou uvedeny parametry a základní rozměry žlabu PARS P3.

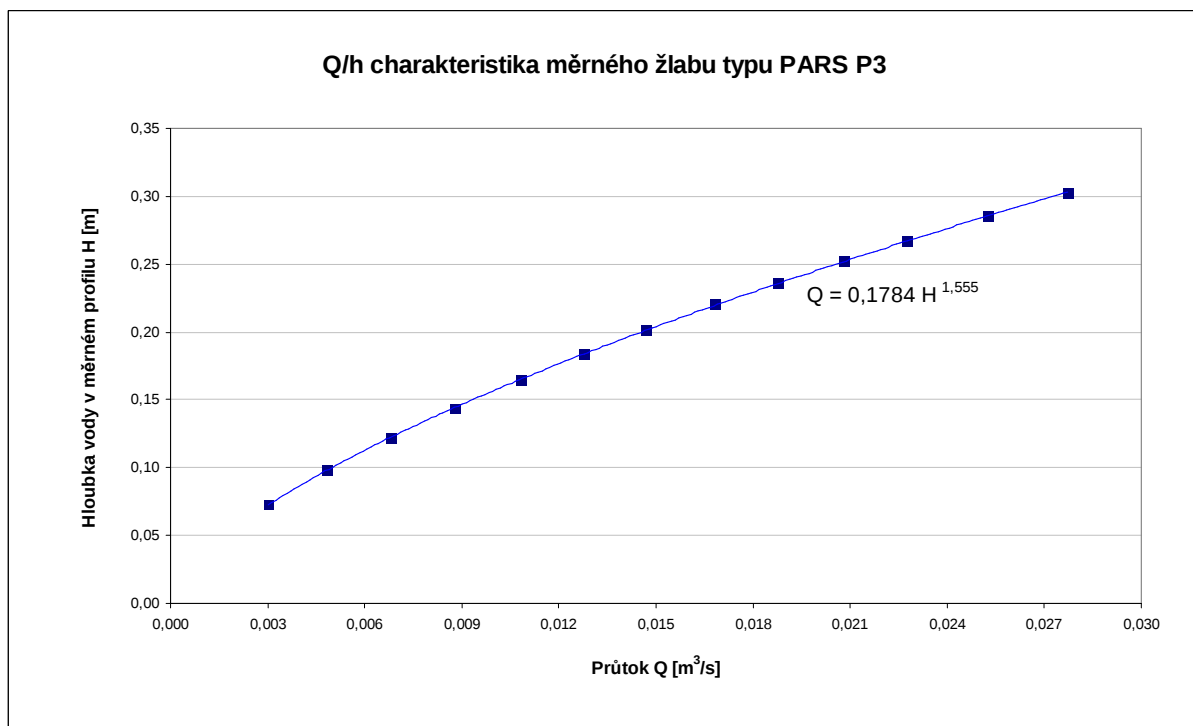
| Parametr   |                                                  | jednotka                     | hodnota |
|------------|--------------------------------------------------|------------------------------|---------|
| $Q_{\min}$ | minimální průtok žlabem                          | $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0,78    |
| $Q_{\max}$ | maximální průtok žlabem                          | $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ | 54,6    |
| B'         | vzdálenost od hrdla pro výpočet konzumční křivky | mm                           | 390     |
| B          | vzdálenost místa hydrometrování od hrdla         | mm                           | 250     |
| V          | celková šířka žlabu                              | mm                           | 399     |
| L          | celková délka žlabu                              | mm                           | 915     |
| W          | šířka hrdla žlabu                                | mm                           | 76,2    |
| D          | šířka žlabu v místě nátoku                       | mm                           | 258,8   |
| C          | šířka žlabu v místě výtoku                       | mm                           | 178     |
| E          | výška nátokové části                             | mm                           | 467     |
| U          | výška výtokové části                             | mm                           | 492     |
| m          | hmotnost žlabu                                   | kg                           | 19,1    |

Tab. 3.1 Výpis základních parametrů měrného žlabu P3 (doplnění Obr. 3.2)



Obr. 3.3 Protiproudň pohled na žlab typu PARS P3

Na Obr. 3.3 je patrný tvar měrného žlabu a uložení v otevřeném korytě. Graf 3.1 znázorňuje charakter Q/H charakteristiky žlabu typu PARS P3, jehož jednotlivé body byly stanoveny pomocí rovnice (3.1) udávané výrobcem. Body odpovídají hodnotám průtoků, které byly v laboratoři na tomto konkrétním žlabu měřitelné.



*Graf 3.1 Q/H charakteristika měrného žlabu typu PARS P3*

#### 4. Plošná integrační metoda

V této kapitole je popsán princip metody rychlostního pole a její jedné speciální metody, kterou je metoda integrační.

Metoda rychlostního pole je často využívána v systémech s volnou hladinou. Stanovení průtoku pomocí této metody, jak je uvedeno v [8], je založeno na integraci funkce rychlostního pole přes plochu průtočného průřezu  $S$  ve smyslu rovnice:

$$Q = \int_S f(u) dS = \iint_S f(u) dx dy, \quad (4.1)$$

kde

$f(u)$  – funkce rychlostního pole.

Obvykle se funkce rychlostního pole stanoví tak, že ve vhodně zvolených měrných bodech průtočného profilu jsou změřeny bodové rychlosti  $u$ , které jsou pak následně aproximovány vhodnou matematickou funkcí. Podle většiny autorů je stanovení funkce bodových rychlostí a její následná integrace prováděna nejdříve po výšce měrného profilu (ve svislicovém či mezisvislicovém pásu). Dostáváme tak průměrnou rychlost  $\bar{v}_i$  na měrné

svislici. Následně jsou tyto průměrné rychlosti na svislicích aproximovány a integrovány po šířce měrného profilu, čímž obdržíme hodnotu průtočného množství  $Q$ . V praxi je tento postup zapisován rovnicí:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot \bar{v}_i, \quad (4.2)$$

kde

$Q$  – hodnota stanoveného průtoku,

$b_i$  – šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu,

$h_i$  – hloubka svislicového nebo mezisvislicového pásu,

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

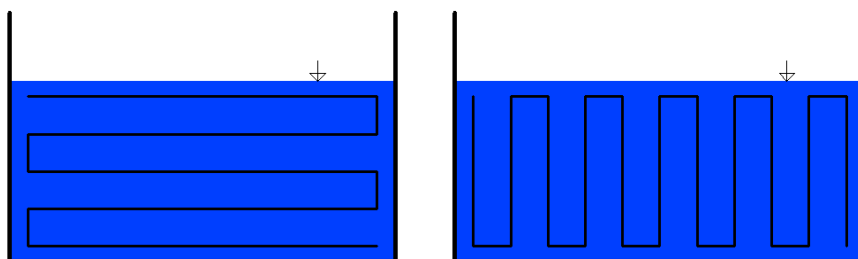
$m$  – počet svislicových nebo mezisvislicových pásů.

Mnohdy obtížný přístup k měrnému profilu a možnost regulace a stabilita průtoků pouze na krátkou dobu v místě provádění měření vytváří tlak na hledání časově nepříliš náročné metody. Řešením může být metoda, která dostatečně přesným způsobem a v relativně krátkém časovém úseku (v řádu několika málo minut) umožní korektní stanovení průtoku. Tou může být v těchto případech integrační metoda.

Integrační metodu lze využít pro stanovení průměrné rychlosti na svislici. Možné je však tuto metodu použít i pro přímé stanovení průřezové rychlosti. V tomto případě pohybujeme vodoměrnou vrtulí po dráze zvolené tak, aby postihla plochu celého profilu. Při volbě způsobu pojezdu po ploše měrného profilu nehraje roli pouze tvar průřezu a deformace rychlostního pole, ale také zkušenost měřiče. Při měření v prizmatických profilech je vhodné volit pojezd vodoměrné vrtule v horizontálách nebo vertikálách (Obr. 4.1). Počet horizontál resp. vertikál je závislý především na velikosti průřezu měrného profilu a požadované přesnosti měření.

Základním požadavkem pro eliminaci vlivu interference rychlostí proudu a pojezdu, jak je uvedeno v [2] je, aby rovnoměrná pojezdová rychlost vrtule nepřekročila 5 % průměrné rychlosti vody a v žádném případě by neměla překročit rychlost 0,04 m/s. Z provedených rozsáhlých experimentálních prací je však skutečnost taková, že „běžná“ rychlost pojezdu vrtule nemá prakticky žádný vliv na měření aktuální rychlosti vody. Interference rychlostí se výrazně neprokázala, jak také uvádí Sýkora ve své diplomové práci [3].

V rámci našeho výzkumu na měrném žlabu byla hodnota rychlosti pojezdu stanovena na základě rychlostí pojezdu vodoměrné vrtule při výzkumu v měrných tratích v LVV uvedeném v [3].



Obr. 4.1 Schéma pojezdu – po horizontálách, po vertikálách

Při měření zaznamenáváme jak počet otáček vodoměrné vrtule, tak i dobu měření. Průřezová rychlost se následně stanoví ze vztahu:

$$v = \alpha + \beta \cdot n, \quad (4.3)$$

kde

$\alpha, \beta$  – kalibrační konstanty vodoměrné vrtule,

$n$  – frekvence otáček vodoměrné vrtule.

Tento vztah pro přepočítání mezi otáčkami vrtule a rychlostí proudění vody je základní charakteristikou vodoměrných vrtulí.

#### 4.1. Opravný koeficient $k$

Z charakteru integrační metody je zřejmé, že pohyb vodoměrné vrtule po ploše profilu zcela přesně nepostihuje rozložení rychlosti v profilu, a to zejména u stěn. V souladu s [4,7] je patrné, že vyhodnocení skutečné průřezové rychlosti v měrném profilu je prováděno bez ohledu na existenci rychlostního gradientu v přístěnné oblasti měrného profilu. Z tohoto předpokladu vyplývá, že rychlosti stanovené touto metodou jsou pro většinu typů rychlostních polí vždy vyšší než rychlosti skutečné, a proto se zavádí opravný koeficient  $k$  ve smyslu vztahu:

$$v_{prf} = k \cdot v, \quad (4.4)$$

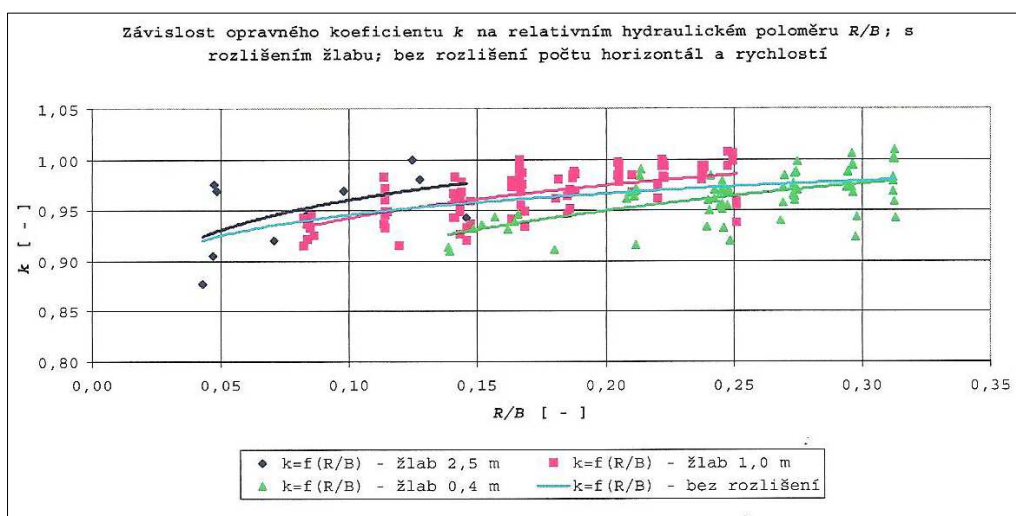
kde

$v_{prf}$  – profilová rychlost,

$v$  – rychlost stanovená integrační metodou.

U obvyklých deformací rychlostních polí by opravný koeficient  $k$  neměl překročit hodnotu 1. Stanovení tohoto opravného koeficientu není snadné a vyžaduje náročný hydraulický výzkum v podmínkách s definovanými průtokovými poměry.

Problematickou opravného koeficientu se také zabýval Unčovský ve své diplomové práci [4]. Výsledky svého výzkumu z roku 2004 shrnul do několika grafů, kde vystihl závislosti opravného koeficientu  $k$  na relativním hydraulickém poloměru  $R/B$ . Měření prováděl v Laboratoři vodohospodářského výzkumu na měrných žlabech šířky 0,4 m, 1,0 m a 2,5 m a výsledky vyhodnotil bez nebo s rozlišením počtu horizontál a bez rozlišení měřené rychlosti proudu. V následujícím grafu 4.1 jsou vykresleny závislosti opravného koeficientu  $k$  na  $R/B$  pro různé žlaby, na kterých bylo prováděno hydrometrování v rámci [4].



Graf 4.1 Závislost opravného koeficientu  $k$  na  $R/B$  – s rozlišením a bez rozlišení žlabů

## 5. Cíle a motivace práce

V posledních letech se stále častěji setkáváme se zvyšujícími požadavky na přesná měření při posuzování funkční způsobilosti napevno instalovaných měřidel v systémech s volnou hladinou, jež jsou používána pro měření průtoku a stanovení proteklých objemů. Tato měřidla, ke kterým se řadí také měrné žlaby, slouží pro stanovení výše úplat za odebrané či vypouštěné množství vod v oblasti vodního hospodářství, zemědělství i několika dalších průmyslových odvětvích. V rámci tohoto výzkumu byly stanoveny dva základní cíle.

Prvním cílem této práce je **nalezení vhodného profilu v prostoru konfuzoru měrného žlabu pro aplikaci integrační metody** a posouzení možnosti jejího praktického využití. Budou tak posuzovány dva předem stanovené měrné profily, v kterých bude prováděno hydrometrování třemi způsoby - bodově, integračně strojně a integračně ručně.

Problematika rychlostního pole v měrném profilu, jak je blíže popsáno v kapitole 4, úzce souvisí s hledáním hodnoty opravného koeficientu  $k$ . Dalším cílem naší práce tedy bude **stanovení hodnoty tohoto opravného koeficientu v závislosti na různých průtocích** (hloubkách) v prostoru konfuzoru měrném žlabu. Díky těmto v laboratoři stanoveným hodnotám bude následně možné za využití integrační metody in situ stanovit skutečné hodnoty okamžitých průtoků měrným žlabem.

Výstupem práce je zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot a doporučení pro navazující výzkumné práce, které by bylo možné v budoucnu provést a obohatit jimi výsledky výzkumu.

## **6. Experimentální část**

Autor této bakalářské práce provedl na jaře roku 2012 v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně měření na měrném žlabu typu PARS P3.

Cílem této kapitoly je popis měřicí trati a techniky, která byla k výzkumu využita, a následné popsání průběhu a podmínek, ve kterých bylo měření prováděno. Na závěr je popsáno zpracování dat a prezentovány výsledky.

### **6.1. Měřicí trať a technika**

#### **6.1.1. Popis měřicí trati**

Výzkum proběhl na měrném proskleném sklopném žlabu (Obr. 6.1), který se nachází v Laboratoři vodohospodářského výzkumu v budově F. Jeho šířka je 0,412 m, délka 12,5 m, výška stěn 0,4 m a maximální kapacita při běžném režimu měření 40 l/s. Voda je do něj čerpána pomocí čerpadel z podzemní nádrže a dopravována rozvodným potrubím do nádrže uklidňovací (Obr. 6.1), která je opatřena Thomsonovým přelivem (Obr. 6.2). Kvůli utlumení energie přepadávající vody ze stabilizační (uklidňovací) nádrže je na začátku žlabu umístěn

pár nerezových děrovaných sít. Rozvlnění hladiny je tlumeno deskou z tvrzeného polystyrénu (Obr. 6.2).



*Obr. 6.1 Měrný žlab 04 v LVV v budově F včetně stabilizační nádrže (na pravé straně)*



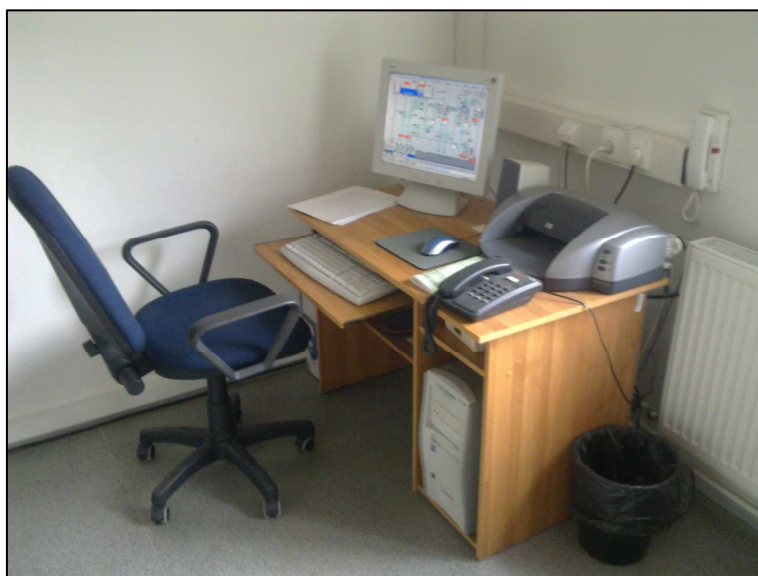
*Obr. 6.2 Umístění tlumící desky z tvrzeného polystyrénu na hladině, páru nerezových děrovaných sít a Thomsonova přelivu na stabilizační nádrži*

Vzdouvací objekt (žlab typu PARS P3) byl osazen 3,00 m před koncem měrného žlabu, odkud voda přepadá a pokračuje zpět do podzemní nádrže. Před nátokem do tohoto žlabu byla instalována 0,40 m dlouhá plechová zavazovací křídla kvůli plynulejšímu nátoku vody do konfuzoru měrného žlabu (Obr. 6.3).

Ovládání celého hydraulického okruhu (nastavení a regulace průtoku) probíhá pomocí řídicího systému z centrálního počítače laboratoře (Obr. 6.4).



*Obr. 6.3 Způsob napojení plechových zavazovacích křídel na vtok do konfuzoru měrného žlabu P3*



*Obr. 6.4 Vizualizační počítač s řídicím systémem v 1.NP laboratoře v budově F*

### **6.1.2. Popis použité techniky**

Pro všechna měření byla použita vodoměrná vrtule se standardním označením č.5 (pracovní označení 30-5) propelerového typu řady C2 vyrobená v OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Německo – Kempten (Obr. 6.5). Tato vrtule je určena pro měření rychlosti vodního

proudu již od nejmenších hloubek, tj. pro laboratoře, říční modely, malé kanály, potrubí, stoky apod. V souladu s tímto určením by měla vyhovovat nejen našemu měření v laboratoři, ale i měřením in situ. Základní parametry vodoměrné vrtule jsou:

- průměr 30 mm;
- stoupání 50 mm;
- minimální měřitelná bodová rychlost  $u_{\min} = 0,05 \text{ m/s}$ ;
- maximální měřitelná bodová rychlost  $u_{\max} = 1,00 \text{ m/s}$ ;
- koeficienty kalibrační rovnice (4.1)  $\alpha = 0,03710$ ,  $\beta = 0,05436$ .

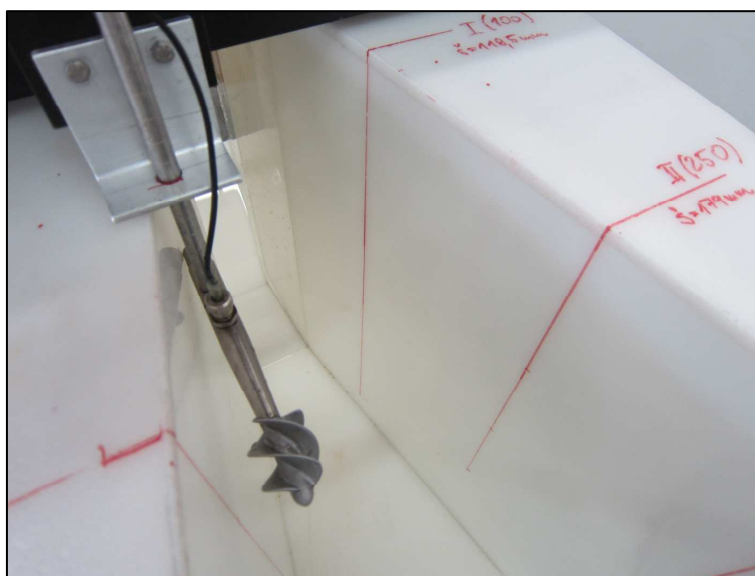
Hodnoty koeficientů  $\alpha$  a  $\beta$  byly převzaty z kalibračních listů a pravidelně kontrolovány ve speciální měrné trati Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Hodnoty těchto koeficientů byly korigovány a následně byla určena nová kalibrační rovnice. Její tvar pro výpočet bodové rychlosti byl vystižen následující závislostí:

$$u = 5,10723 \cdot 10^{-9} f^6 - 4,0323 \cdot 10^{-7} f^5 + 1,25128 \cdot 10^{-5} f^4 - 1,88895 \cdot 10^{-4} f^3 + 1,23286 \cdot 10^{-3} f^2 + 5,29718 \cdot 10^{-2} f + 3,15773 \cdot 10^{-2}, \quad (6.1)$$

kde

$u$  – bodová rychlost,

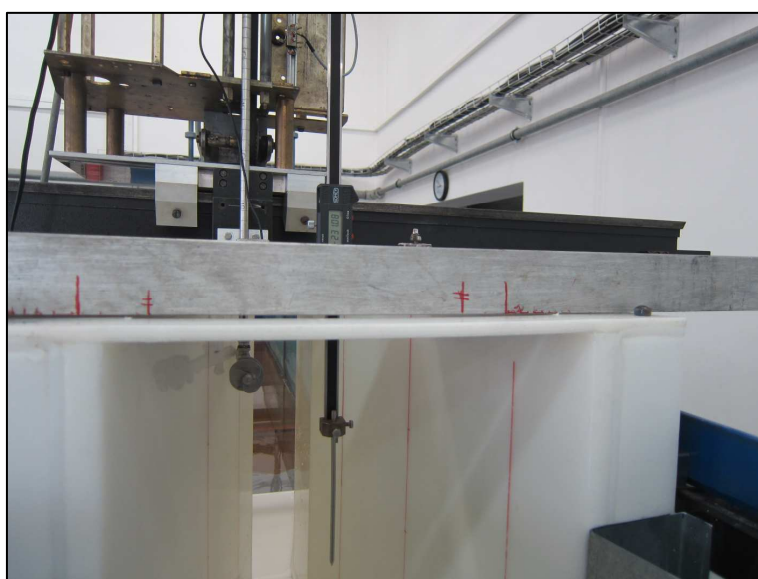
$f$  – frekvence otáček vodoměrné vrtule.



Obr. 6.5 Vodoměrná vrtule připevněná na ocelovou tyč traverzačního zařízení

Vodoměrná vrtule užívaná pro stanovení hodnot rychlostí proudící kapaliny je kontaktní měřidlo. Při měření pomocí kontaktních metod přichází snímač do přímého kontaktu s proudící kapalinou.

Před každým měřením byla provedena výměna speciálního oleje v samotném těle vrtule, které bylo připevněno na 9 mm silnou nosnou ocelovou tyč traverzačního zařízení. Pro měření hloubky vody v měrném profilu konfuzoru bylo použito ocelové pravítko (odečítáno s přesností 0,5 mm) a pro měření hloubky vody v místě hydrometrování digitální hrotový hloubkoměr (Obr. 6.6), který umožňuje měřit s přesností až na 0,01 mm.

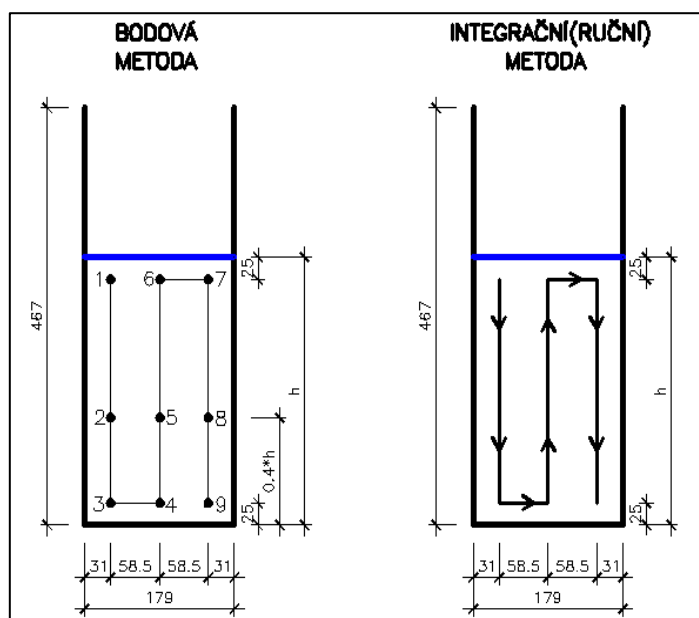


*Obr. 6.6 Digitální hrotový hloubkoměr upevněný na duralovém nosníku napříč měrným žlabem*

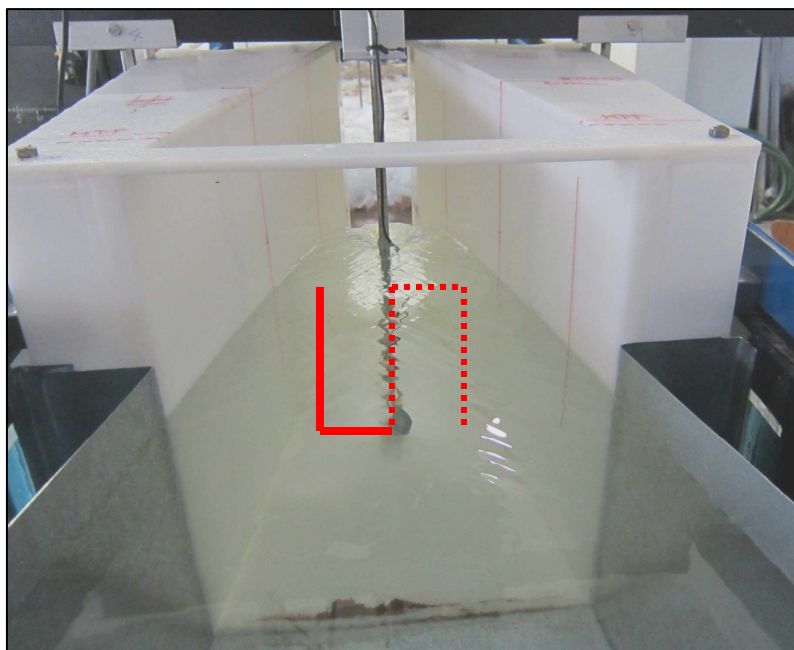
Traverzační zařízení (Obr 6.7), které umožňuje plně automatické, přesné a opakovatelné měření v předem definovaných měrných bodech, je umístěno na ocelovém nosníku napříč měrným profilem. Díky krokovým motorům napojeným na centrální jednotku řídicího počítače je umožněn horizontální a vertikální posun. Dle zadaných parametrů proudu určí zařízení potřebné pozice vodoměrné vrtule pro měření bodových rychlostí. Schéma s vykreslením měrných bodů a pojezdu vodoměrné vrtule ovládané traverzačním zařízením je vykresleno na Obr. 6.8. Vodoměrná vrtule by měla být umístěna ve zvolených bodech svislice tak, aby vodorovná osa měřidla byla v každém bodě rovnoběžná se směrem proudění, jak popisuje [2]. Vyznačení ujeté a předpokládané části pojezdu vodoměrné vrtule ve smyslu tohoto schématu je patrné na Obr 6.9.



Obr. 6.7 Pohled na traverzační zařízení připevněné na ocelovém nosníku napříč žlabem s vodoměrnou vrtulí ve výchozí poloze



Obr. 6.8 Schéma bodového a integračního měření v konfuzoru měrného žlabu P3



*Obr. 6.9 Měrný žlab s vyznačením ujeté a předpokládané části pojezdu vodoměrné vrtule v měrném profilu*

Zařízení vedle pojezdu zajišťuje registraci impulsů generovaných otáčením propeleru, zaznamenává a ukládá je do souboru, který je možné importovat do programu Microsoft Office Excel a dále je vyhodnocovat. K tomuto vyhodnocení sloužil počítač (Obr. 6.10), který byl napojen na traverzační zařízení.



*Obr. 6.10 Počítače pro vyhodnocení naměřených dat*

Pro stanovení aktuálního průtoku měrnou trati byl použit magneticko-indukční průtokoměr DN 150, jenž je instalován protiproudě před ukladňovací nádrží měrného žlabu. K odečtu aktuálního průtoku slouží vyhodnocovací jednotka (Obr. 6.11) upevněná na zdi v laboratoři v blízkosti měrné trati. Nejen že počítá a zobrazuje okamžitý průtok, ale také provádí časovou integraci okamžitého průtoku na proteklý objem, který zobrazuje a archivuje. Vykazované hodnoty průtoků vyhodnocovací jednotkou byly ve smyslu kalibračního listu měřidla korigovány.



*Obr. 6.11 Vyhodnocovací jednotka zobrazující aktuální průtok žlabem 04*

Posledním použitým zařízením byl čítač impulsů (Obr. 6.12), který byl použit pro ruční měření. Přístroj s velmi jednoduchým ovládáním, jenž měří dobu pojezdu vodoměrné vrtule a počet impulsů, které vrtule zaznamenala. Tyto dva vstupní parametry sloužily pro výpočet frekvence otáček a následné stanovení průřezové rychlosti.



*Obr. 6.12 Čítač impulsů zobrazující dobu pojezdu a počet impulsů vodoměrné vrtule a frekvenci otáček*

## 6.2. Postup měření

Pomocí řídicího počítače v 1.NP byla před začátkem každého měření nastavena požadovaná hodnota průtoku. Po vyregulování a stabilizaci průtoku ve žlabu byla nejprve v konfuzoru měrného žlabu v místě určeném jeho výrobcem (0,39 m protiproudě před hrdlem) změřena ocelovým pravítkem hloubka vody pro stanovení (kontrolu) Q/H charakteristiky a následně se změřila hrotovým hloubkoměrem úroveň hladiny v místě hydrometrování. Pro dosažení co možná nejpresnějších výsledků byl odečet hladiny proveden desetkrát, protože i po vyregulování průtoků hladina mírně kolísala. Nakonec se nastavila potřebná data do řídicího softwaru traverzačního zařízení. Konkrétně to byla hloubka vody v místě hydrometrování, počet opakování bodového a integračního měření a složka na disku, kam se budou naměřená data ukládat. Poté mohlo začít samotné měření. Po započatém měření byl aktuální průtok ve žlabu průběžně odečítán z vyhodnocovací jednotky. Veškeré hodnoty průtoků a hloubek, které byly zaznamenávány do tabulek a následně vyhodnocovány, jsou součástí přílohové části práce.

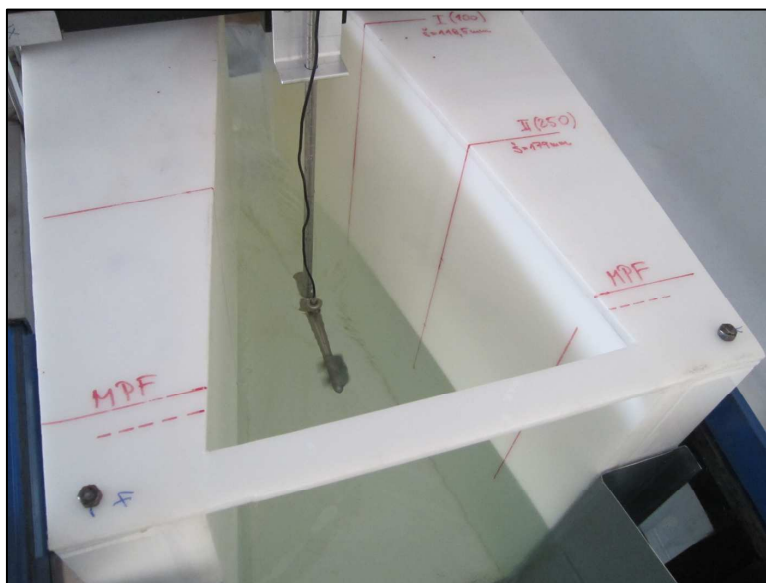
Samotné měření probíhalo třemi způsoby podle Obr. 6.8. Dva z nich byly měřené strojně, pomocí traverzačního zařízení, třetí způsob byl ruční.

Při měření bodovým způsobem vodoměrná vrtule setrvává a zaznamenává impulsy v každém z devíti bodů po dobu 30 s. Při integračním způsobu dochází k záznamu impulsů po celou dobu rovnoměrného pojezdu vrtule měrným profilem. Ruční způsob vedení

vodoměrné vrtule měrným profilem, která byla připevněna na ocelové tyči s rukojetí, probíhal po stejné trase a přibližně stejnou dobu jako při způsobu strojním.

Způsob pojezdu vrtule byl zvolen pouze jeden a to po třech vertikálách ve smyslu Obr 6.8. Rychlost pojezdu vrtule po takto stanovené dráze byla při strojním integračním měření nastavena na 1 m/min, viz kapitola 4.1. Tato rychlost je vhodná i pro ruční měření.

Hydrometrování pomocí traverzačního zařízení probíhalo ve dvou profilech, jak je blíže popsáno v kapitole 6.3.1. Znázornění obou profilů je patrné z Obr. 6.13.



Obr 6.13 Konfuzor žlabu PARS P3, s oběma vyznačenými polohami pro hydrometrování a místem měrného profilu (MPF), ke kterému je vztažena  $Q/H$  charakteristika

### 6.2.1. Okrajové podmínky při měření

Strojní měření probíhalo pro 5 různých průtoků (3,7; 6; 11; 17 a 28 l/s). Tomuto rozsahu průtoků odpovídají v místě hydrometrování rychlosti vody přibližně od 0,27 m/s do 0,54 m/s a hloubky od 0,08 m do 0,30 m. Ruční měření bylo doplněno ještě o celou řadu průtoků v daném rozmezí. Hlavním důvodem bylo zpřesnění výsledků výzkumu a fakt, že tímto způsobem budou probíhat měření in situ.

S měnícím se rozsahem hloubek v místě měření se úměrně zvětšuje i průtočný průřez. Měření probíhalo na třech vertikálách. Jedna vertikála se nacházela uprostřed a dvě při krajích. U těch krajních v blízkosti stěn bylo vodoměrné vrtuli „povoleno“ přiblížit se na 31 mm od stěn konfuzoru. Z hlediska výškového byly měrné body (dojezd vrtule) nastaveny ve třech úrovních, 25 mm ode dna, ve 40 % hloubky proudu a 25 mm od hladiny.

### **6.3. Zpracování dat a prezentace výsledků**

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky všech provedených měření v laboratoři. Veškeré naměřené parametry byly zpracovány v programu Microsoft Office Excel a jsou součástí Příloh. V rámci celého výzkumu bylo v laboratoři na žlabu PARS P3 provedeno 51 sad po 5 nebo 10 měřeních, tedy 375 měření:

- bodovou metodou – 5 sad po 10 měřeních;
- strojní integrační metodou – 5 sad po 10 měřeních;
- ruční integrační metodou – 14 sad po 10 měřeních a 27 sad po 5 měřeních.

Zpracování naměřených dat bylo postupné. Nejdříve bylo naměřeno a zpracováno strojní měření (bodová a integrační metoda). Následně bylo traverzační zařízení odebráno a provedlo se měření ruční.

#### **6.3.1. Hledání vhodného profilu v konfuzoru měrného žlabu**

Strojní měření bylo realizováno ve dvou profilech konfuzoru měrného žlabu. První profil byl 0,10 m a druhý 0,25 m protiproudě před začátkem hrdla žlabu. Vzdálenost od hrdla pro první profil jsme získali poté, co jsme instalovali traverzační zařízení s nosnou ocelovou tyčí vodoměrné vrtule v části žlabu, která nad hrdlem propojuje boční stěny. Požadovanou vzdálenost 0,10 m získáme mezi počátkem hrdla a středem propeleru vodoměrné vrtule. Vzdálenost 0,25 m pro druhou polohu hydrometrování jsme zvolili postupně na základě zkušeností z měření v prvním profilu. Toto místo se nachází přibližně v polovině konfuzoru.

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům, které byly dosaženy v prvním profilu, pokračoval výzkum všech metod dále pouze v poloze druhé (0,25 m protiproudě před začátkem hrdla). Důvodem „opuštění“ prvního profilu bylo přílišné vzdouvání hladiny, jež bylo způsobeno ucpáním vtoku na začátku hrdla žlabu nosnou tyčí vodoměrné vrtule. Během měření tak docházelo ke změnám hloubky vody v místě hydrometrování v závislosti na míře zatopení nosné tyče vodoměrné vrtule.

### 6.3.2. Stanovení opravného koeficientu $k$

Cílem této kapitoly je popis postupu stanovení opravného koeficientu z měřených veličin v laboratoři a zhodnocení dosažených výsledků výzkumu s doporučením hodnot opravného koeficientu  $k$  pro měření in situ. Stanovení tohoto koeficientu by mělo být možné vystihnout v závislosti na aktuálním průtoku nebo hloubce.

Při bodové a integrační strojní metodě je pomocí traverzačního zařízení zaznamenána doba měření  $t$  a jí odpovídající počet impulsů vodoměrné vrtule  $n$ . Z těchto veličin se následně stanovila frekvence otáček vodoměrné vrtule, která ve smyslu vztahu (6.1) sloužila pro výpočet bodové rychlosti  $u$ . Tyto rychlosti se v rámci každého cyklu měření pro různé průtoky zprůměrovaly za vzniku průměrné hodnoty průřezové rychlosti  $v$ . Finální hodnota opravného koeficientu  $k$  se stanovila pomocí rovnice (4.4), kde  $v_{prf}$  byla stanovena ze skutečného průtoku  $Q_{skut}$  a známé plochy průřezu  $S$ . Plocha průtočného průřezu byla uvažována svislým řezem v profilu měření.

Strojní integrační metodou jsme se přesvědčili, že tento postup je možný, a proto jsme přistoupili k ruční metodě. Postup stanovení opravného koeficientu v rámci ruční metody probíhal obdobně s jediným rozdílem, že přístrojem pro záznam doby pojezdu vodoměrné vrtule a počtu impulsů byl čítač popsán v kapitole 6.1.2 a zobrazený na Obr. 6.12.

Výsledné hodnoty opravného koeficientu pro bodové, integrační i ruční měření byly vyneseny do grafu 6.1 a proloženy vhodnými funkcemi. Pro stanovení opravného koeficientu v rámci bodového měření slouží rovnice lineární funkce ve tvaru:

$$k = 0,016 \cdot H + 0,9579, \quad (6.3)$$

kde

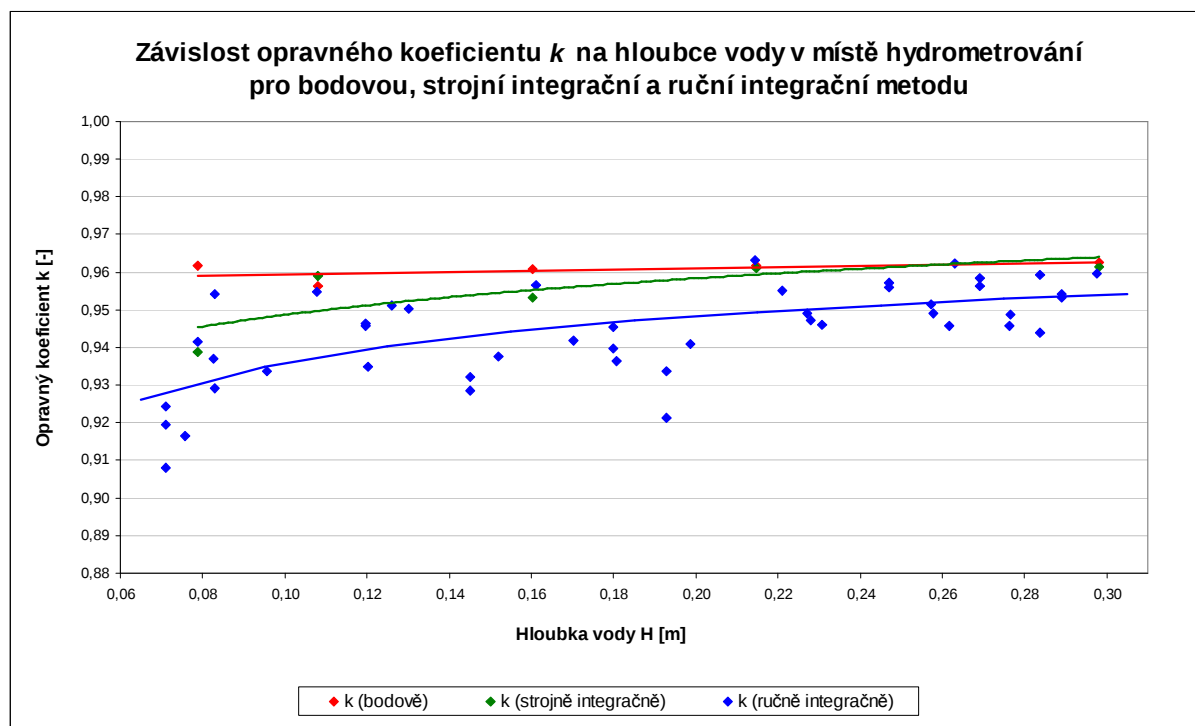
$H$  – hloubka vody v místě hydrometrování (v metrech).

V případě ručního měření byla naměřenými hodnotami proložena regresní funkce, jejíž rovnice byla vyhledána pomocí funkce „řešitel“ v programu MS Excel s využitím metody nejmenších čtverců. Rovnici pro výpočet opravného koeficientu lze vystihnout ve tvaru:

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{0,0089}{H} \right)^{0,2} \right]^{0,069}, \quad (6.4)$$

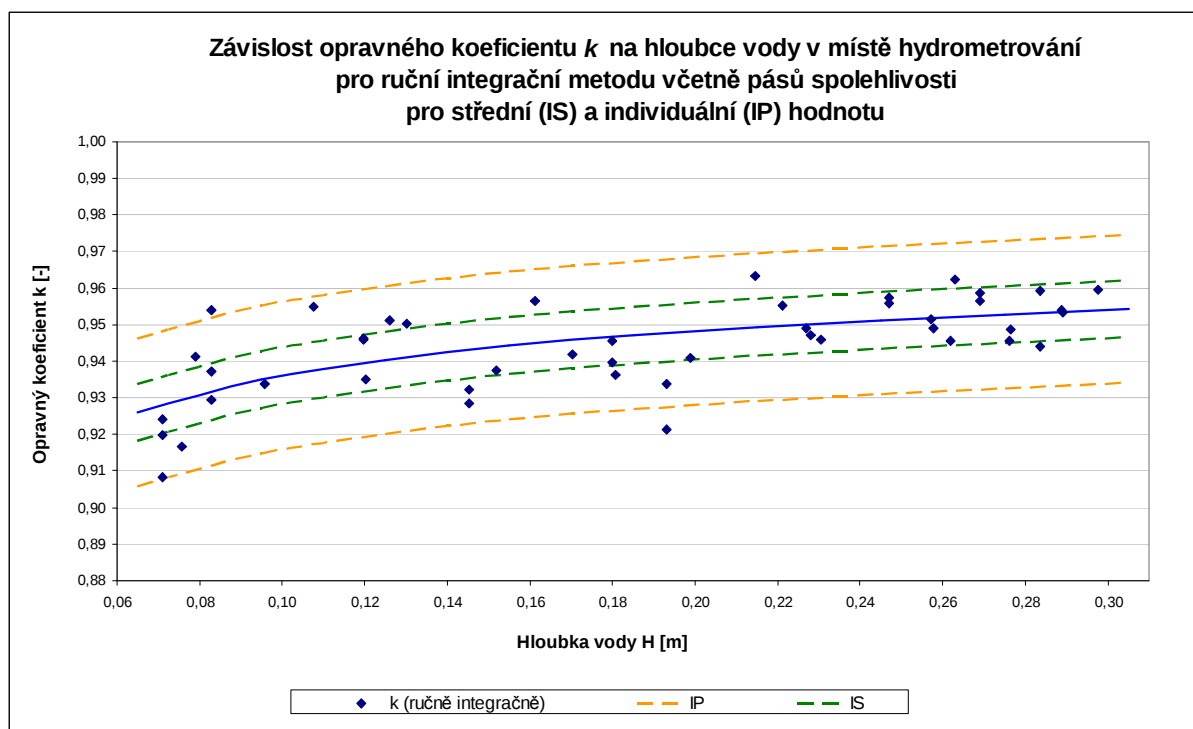
kde

$H$  – hloubka vody v místě hydrometrování.



Graf 6.1 Závislost opravného koeficientu  $k$  na hloubce vody – měrný žlab typu PARS P3

V grafu 6.2 jsou vyneseny výsledné hodnoty opravného koeficientu pouze pro ruční měření, avšak regresní křivka je obohacena o pásy spolehlivosti pro střední a individuální hodnotu. Tyto pásy jsou konstruovány z intervalových odhadů střední funkční hodnoty, resp. individuální funkční hodnoty a vyjadřují rozmezí, kterému budou s jistou pravděpodobností výskytu jednotlivá měření náležet.



*Graf 6.2 Závislost opravného koeficientu  $k$  na hloubce vody včetně pásů spolehlivosti pro střední a individuální hodnotu – měrný žlab typu PARS P3*

### 6.3.3. Stanovení doby pojezdu vodoměrné vrtule

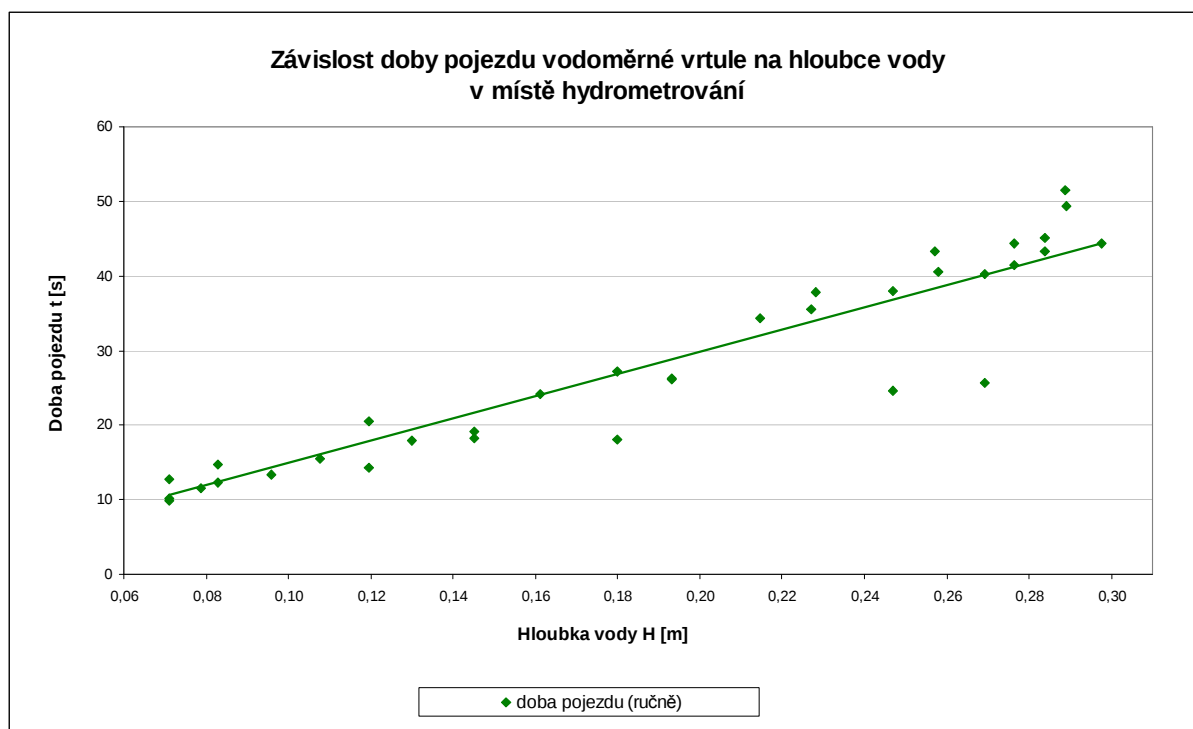
Doba pojezdu vodoměrné vrtule při integrační metodě trvala různě dlouho v závislosti na hloubce vody v konfuzoru měrného žlabu. Při ručním hydrometrování byl kladen důraz na to, aby doba pojezdu vrtule odpovídala přibližně hodnotám strojního měření. V závislosti na jednotlivých časech pojezdu vrtule při hladinách odpovídajících různým průtokům byl sestaven graf 6.3. Hodnotami, jež byly vyneseny do grafu, byla proložena lineární funkce, jejíž rovnice má tvar:

$$t = 149 \cdot H, \quad (6.5)$$

kde

$t$  – doporučená doba pojezdu (v sekundách),

$H$  – hloubka vody v místě hydrometrování.



*Graf 6.3 Závislost doby pojezdu vodoměrné vrtule na hloubce vody*

#### 6.4. Diskuze dosažených výsledků

Z předložených výsledků výzkumu v kapitole 6.3, který se zabýval hledáním opravného koeficientu  $k$ , je patrné, že využití integrační metody pro stanovení průtočného množství v konfuzoru měrného žlabu je jednou z možností dosažení správných výsledků. Vypovídá o tom i fakt, že hodnoty odečtené na křivce výsledné regresní funkce (graf 6.1) se velice přibližují hodnotám z grafu 4.1, ke kterým dospěl Unčovský při svém výzkumu na měrných tratích za stejného poměru R/B jako při našem výzkumu.

Hodnotu opravného koeficientu  $k$  pro všechny tři metody použité v rámci hydrometrování při výzkumu (bodová, integrační strojní a integrační ruční) lze odečíst z grafu 6.1 pro danou hloubku proudu. Hodnotu tohoto koeficientu v případě ručního měření lze vypočítat na základě rovnice regresní funkce (6.4).

V tomto grafu si můžeme povšimnout jisté neshody mezi integračním strojním a ručním měřením. Důvodem může být fakt, že ruční způsob vedení vodoměrné vrtule nemůže být natolik přesný jako v případě strojního měření. Dokazuje to zejména variabilita (rozptyl) jednotlivých stanovených bodů kolem regresní křivky. Tento rozdíl mezi oběma metodami po proložení bodů vhodnou funkcí však činí přibližně 1%, z čehož vyplývá, že strojní měření je bezpečně pokryto tolerančními mezemi regresní funkce (znázorněny v grafu 6.2) v rámci

ručního měření. Z těchto výsledků vyplývá nutnost opakování jednotlivých ručních měření. Ze zkušeností pracovníků laboratoře a analýzy nejistot, která není součástí této práce, je minimální doporučený počet opakování měření roven třem.

V rozmezí hloubek přibližně (0,06 – 0,30 m) v místě hydrometrování (měrný profil 2), nabývají hodnoty opravného koeficientu v případě všech metod různých rozměrů. Tyto hodnoty se v případě bodového měření pohybují přibližně okolo hodnoty 0,96 s mírnou tendencí růstu v závislosti na rostoucí hloubce vody v měrném profilu. V případě integračního měření se hodnoty opravného koeficientu pohybují v intervalu (0,945 – 0,965). Po proložení těchto bodů mocninnou funkcí si povšimneme, že křivka pro integrační měření leží o něco výš než regresní křivka sestavená na základě jednotlivých bodů ručního měření, jak bylo popsáno výše. Hodnoty opravného koeficientu v rámci ručního měření nabývají hodnot (0,925 – 0,955), jak je dobře patrné z grafu 6.1.

Graf 6.2 představuje body naměřené ruční metodou a vynesenu regresní křivku včetně pásů spolehlivosti pro střední hodnotu (viz užší pás kolem regresní křivky) a pro individuální hodnotu (viz širší pás kolem regresní křivky). Tyto pásy jsou konstruovány z intervalových odhadů střední funkční hodnoty, resp. individuální funkční hodnoty a vystihují míru přesnosti regresní funkce, resp. individuálního měření. Tyto parametry jsou následně využívány pro stanovení nejistoty měření použité integrační metody.

Závislost v grafu 6.3 nám udává doporučenou hodnotu doby pojezdu vodoměrné vrtule měrným profilem pro námi zkoumaný rozsah průtoků, resp. rozsah hloubek v místě hydrometrování. Byla také stanovena rovnice (6.5) určující doporučenou dobu pojezdu. Výrazně kratší doba pojezdu může v praxi totiž znamenat vyšší nejistotu měření, ba dokonce dosažení nevypovídajících výsledků. Naopak delší doba pojezdu bude znamenat prodloužení celého procesu stanovení průtočného množství, což v některých případech in situ může vést ke komplikacím.

## **7. Doporučení pro navazující výzkumné práce**

Jelikož není známo, že by se problematikou plošné integrační metody v konfuzorech již dříve někdo zabýval, mohl by být tento výzkum impulzem pro navazující výzkumné práce. Nejen z důvodů využívání měrných žlabů v praxi pro měření průtočného množství, ale i způsobu stanovení proteklého množství pomocí integrační metody, která je velkým přínosem především pro výrazné zkrácení doby měření.

Jednou z možností jak obohatit dosažené výsledky by mohlo být rozšíření práce o výpočet nejistot měření, které s procesem hydrometrování a úředními měřeními bezpochyby úzce souvisí. S tímto výpočtem se dá provést návrh na změny metodiky měření, především v případě nejnižších průtoků. Teprve při stanovení nejistot pro daná měření se totiž výzkum může jevit jako kompletní.

Velkým přínosem by zajisté bylo rozšíření výzkumu v rámci širšího spektra žlabů typu PARS a pro větší škálu průtoků.

## **8. Závěr**

Předložená bakalářská práce shrnuje výsledky výzkumu, který probíhal v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Vysokého učení technického v Brně na jaře roku 2012. Tento výzkum probíhal na měrné trati o šířce 0,4 m, do které byl osazen měrný žlab Parshallova typu s označením PARS P3.

V úvodu práce je čtenář seznámen se základní charakteristikou měrných žlabů a způsobem, jakým se za pomoci měrných žlabů stanovuje průtočné množství. Popisuje také integrační metodu jako nástroj možného nezávislého stanovení průtoku při posuzování funkční způsobilosti měřicího systému, jenž je vybaven měrným žlabem uvedeného typu.

V experimentální části se práce zabývá postupem měření, zpracováním a vyhodnocením naměřených dat, jež jsou součástí příloh. Na závěr jsou diskutovány dosažené výsledky a uvedena možná doporučení pro navazující výzkumné práce týkající se integrační metody a problematiky měření na měrných žlabech.

Práce splnila předem stanovené cíle, kterými v první řadě bylo nalezení vhodného profilu v prostoru konfuzoru měrného žlabu pro aplikaci integrační metody a následné posouzení praktického využití této metody. Dalším úkolem bylo nalezení závislosti opravného koeficientu na hloubce vody v měrném žlabu, což považuji za nejdůležitější přínos celého výzkumu. Tuto závislost nalezneme v grafu 6.1, z níž lze hodnotu opravného koeficientu snadno vyčíst, nebo můžeme hodnoty opravného koeficientu stanovit z regresní rovnice ve smyslu vztahu (6.3), resp. (6.4).

V souvislosti s ruční integrační metodou byl vyvinut přípravek pro snazší a přesnější vedení vrtule (Obr. 8.1). Tento nástavec může být následně použit pro měření in situ na stejném žlabu, na kterém byl prováděn výzkum.



*Obr. 8.1 Fotografie speciálního nástavce pro ruční měření*

Výzkum charakterizoval integrační metodu a zdůraznil její hlavní přednost, kterou je časová nenáročnost a urychlení měřicího procesu, což znamená velký přínos pro měření v praxi. Dosažené výsledky práce mohou být využitelné zejména v pravoúhlých prizmatických korytech s podobnými podmínkami, stejně tak jako při měření v laboratoři a tam, kde nepříznivé poměry nedovolují použití jiných časově náročnějších metod.

## 9. Literatura

- [1] ČSN ISO 9826. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech, Parshallovy žlaby a žlaby typu Saniiri, Český normalizační institut, 1994
- [2] ČSN EN ISO 748. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole, Český normalizační institut, 2001
- [3] Sýkora, L. Diplomová práce – Zhodnocení integrační metody pro stanovení průměrné rychlosti na svislici v prizmatických korytech, VUT v Brně, 2003, 50 str.
- [4] Unčovský, O. Diplomová práce – Zhodnocení integrační metody pro stanovení průřezové rychlosti v prizmatických korytech, VUT v Brně, 2004, 56 str.
- [5] Fejfarová, M. Bakalářská práce – Měření průtoku za pomoci ostrohranných přelivů v podmínkách ovlivnění hladinou dolní vody, VUT v Brně, 2008, 36 str.
- [6] [www.pars-aqua.cz](http://www.pars-aqua.cz) [online]. 2004. Pars aqua s.r.o.  
Dostupné z : <<http://www.pars-aqua.cz/clanek13.html>>.
- [7] TNV 25 9305. Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou. Hydroprojekt CZ a.s., Praha. Odvětvová technická norma vodního hospodářství, 2012
- [8] Žoužela, M. Disertační práce – Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou, VUT v Brně, 2005, 106 str.
- [9] Žoužela, M. Měřicí systémy proteklého množství vody užívané v profilech s volnou hladinou. Metrologie, 3/2008, str. 10-16

### Seznam použitých vztahů pro zpracování dat:

V této části práce je uveden výčet vztahů a rovnic, které byly použity pro stanovení opravného koeficientu  $k$  v rámci vyhodnocení a zpracování příloh.

1) výpočet plochy  $S$  v místě hydrometrování pomocí hloubky proudu  $H$  v místě měrného profilu a šířce žlabu  $\check{S}$  v místě hydrometrování:

$$S = \check{S} \cdot H$$

2) výpočet profilové rychlosti proudění  $v_{prf}$  pomocí plochy  $S$  a skutečného průtoku  $Q_{skut}$ :

$$v_{prf} = \frac{Q_{skut}}{S}$$

3) výpočet frekvence  $f$  pomocí doby měření (doby pojezdu) vodoměrné vrtule  $t$  a počtu zaznamenaných impulsů  $n$ :

$$f = \frac{n}{t}$$

4) výpočet bodové rychlosti  $u$  pomocí frekvence  $f$ :

$$u = 5,10723 \cdot 10^{-9} f^6 - 4,0323 \cdot 10^{-7} f^5 + 1,25128 \cdot 10^{-5} f^4 - 1,88895 \cdot 10^{-4} f^3 + 1,23286 \cdot 10^{-3} f^2 + 5,29718 \cdot 10^{-2} f + 3,15773 \cdot 10^{-2},$$

5) výpočet průměrné bodové rychlosti  $\bar{u}$ :

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}; \text{ kde } n = 1, 2, \dots, 9$$

6) výpočet rychlosti  $v$  získané přímým měřením pomocí průměrných bodových rychlostí  $\bar{u}$ :

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{u}$$

7) výpočet opravného koeficientu  $k$  pomocí profilové rychlosti  $v_{prf}$  a rychlosti měřené  $v$ :

$$k = \frac{v_{prf}}{v}$$

## Seznam příloh:

P1 – Tabelární zpracování strojního měření bodovou metodou v konfuzoru žlabu P3 v profilu 0,25 m protiproudě před jeho hrdlem,

P1/1 – bodová metoda pro průtok (3,7 l/s),

P1/2 – bodová metoda pro průtok (6,0 l/s),

P1/3 – bodová metoda pro průtok (11,0 l/s),

P1/4 – bodová metoda pro průtok (17,0 l/s),

P1/5 – bodová metoda pro průtok (28,0 l/s),

P2 – Tabelární zpracování strojního měření integrační metodou v konfuzoru žlabu P3 v profilu 0,25 m protiproudě před jeho hrdlem,

P2/1 – integrační metoda pro průtok (3,7 l/s),

P2/2 – integrační metoda pro průtok (6,0 l/s),

P2/3 – integrační metoda pro průtok (11,0 l/s),

P2/4 – integrační metoda pro průtok (17,0 l/s),

P2/5 – integrační metoda pro průtok (28,0 l/s),

P3 – Tabelární zpracování ručního měření integrační metodou v konfuzoru žlabu P3 v profilu 0,25 m protiproudě před jeho hrdlem,

P3/1 – ruční metoda pro průtoky (3,5; 3,7 a 5,0 l/s),

P3/2 – ruční metoda pro průtok (6,0; 7,0 a 8,0 l/s),

P3/3 – ruční metoda pro průtok (10,0; 11,0 a 13,0 l/s),

P3/4 – ruční metoda pro průtok (15,0; 17,0 a 19,0 l/s),

P3/5 – ruční metoda pro průtok (23,0 a 28,0 l/s),

*Pozn.: Počet opakování měření v případě P3/1 – P3/5 byl  $n = 10$ .*

P3/6 – ruční metoda pro průtok (3,1; 4,0 a 7,0 l/s),

P3/7 – ruční metoda pro průtok (7,0; 9,5; 13,0 a 14,5 l/s),

P3/8 – ruční metoda pro průtok (14,5; 18,5; 21,0 a 22,5 l/s),

P3/9 – ruční metoda pro průtok (22,5; 24,0; 25,0 a 26,0 l/s),

P3/10 – ruční metoda pro průtok (26,0 a 27,0 l/s),

P3/11 – ruční metoda pro průtok (4,0; 8,0; 12,0; 18,0 a 24,0 l/s),

*Pozn.: Počet opakování měření v případě P3/6 – P3/11 byl  $n = 5$ .*