



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VLIV VOLBY MĚRNÉHO PROFILU V HYDROMETROVACÍM PROCESU

EFFECT OF OPTIONS MEASUREMENT PROFILE IN THE HYDROMEASURING PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Jurčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, dle pokynů vedoucího diplomové práce a konzultanta. Všechny podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 24.5.2013

.....

Michaela Jurčová



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michaela Jurčová
Název	Vliv volby měrného profilu v hydrometrovacím procesu
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Pavel Zubík, 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

Boor, B.,Kunštátský, J.,Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

ČSN EN ISO 748. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech, Metody rychlostního pole, 2001

Slota, R.: HYDRO 11, User's Manual, Integrated System for Hydrometric Data Processing and Discharge Evaluation in Open Channels and Closed Conduits. Bratislava, 2000

Žoužela, M.: Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou, disertační práce, VUT v Brně 2005

Zásady pro vypracování

Úkolem studenta je provést sadu měření hydrometrovací metodou s různým umístěním měrného profilu v oblasti přechodu kruhového profilu na obdélníkový profil, statisticky vyhodnotit výsledky a stanovit velikost možné systematické chyby v hydrometrovacím měřicím procesu.

Cílem je navrhnout doporučení pro optimální volbu měrného profilu a definovat velikost potenciální nepřesnosti stanoveného průtoku v daných prostorových podmínkách.

.....

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem volby měrného profilu v hydrometrovacím procesu. Kdy na základě zpracovaného souboru měření jsme schopni určit vhodnou relativní vzdálenost měrného profilu za vyústění trubky. Při určování vhodného profilu vycházíme z požadavku, aby chyba měření byla menší než 5%. Měření bylo zpracováno na zkušební trati ústavu vodních staveb. Výstupem je graf závislosti procentuální odchylky stanoveného průtoku na poměrné vzdálenosti od ústí trubky a relativní výšce plnění.

Klíčová slova

Vodoměrná vrtule, hydrometrovací proces, zkušební trať.

Abstract

This bachelor thesis is focused at effect of options measurement profile in the hydromeasuring process. When based on processing of acquired data sample we can determine proper relative distanc measurement profile behind outfall pipe. Determination of proper profile is based on condition that measurement error must be less than 5%. Measurements were assessed at testing track at institute of water structures. Outcome is graph of dependence of percent deviation of determined flow to relative distance behind outfall pipe and relative filling height.

Keywords

Hydrometrical propellers, hydromeasuring process, test track.

Bibliografická citace VŠKP

JURČOVÁ, Michaela. *Vliv volby měrného profilu v hydrometrovacím procesu*. Brno, 2013. 58 s., 13 příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24.5.2013

.....
Michaela Jurčová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D. za pomoc při měření a za všechny podmětne připomínky, které mi pomohly při zpracovávání celé práce. Také bych chtěla poděkovat pracovníkům LVV, kteří mi pomohli při tvorbě vhodných podmínek k měření.

OBSAH

1. Úvod	11
2. Základní pojmy	12
2.1. Průtočný průřez, průtok, průřezová rychlost	12
2.2. Způsoby měření průtoku	13
2.2.1. Do nádoby	13
2.2.2. Pomocí hydrometrické vrtule	13
2.2.3. Pomocí indikátorových metod	16
2.2.4. Nové metody při měření průtoků	16
2.3. Stanovení rychlosti	17
2.4. Stanovení průtočného množství	19
3. Měření průtoku kapalin	20
3.1. Normy	20
3.2. Metoda rychlostního pole	20
3.2.1. Princip metody rychlostního pole	20
4. Nejistota měřené veličiny	23
4.1. Všeobecně	23
4.2. Přídavné nejistoty	24
4.3. Nejistota typu A	25
4.4. Nejistota typu B	26
5. Experimentální část práce	28
5.1. Průběh práce	28
5.1.1. Použité vybavení	29
5.1.2. Parametry měrné trati	30
5.1.3. Ovládání měřícího procesu	32
5.1.4. Parametry měření	33
5.2. Vyhodnocení hydrometrování	33
5.2.1. Stanovení odchylky měření	34
5.2.2. Coriolisovo kritérium	36
5.2.3. Boussinesquovo kritérium	37
5.2.4. Zpracování ve 3D závislosti	38

6.	Závěr	39
7.	Seznam použitých zdrojů	40
8.	Seznam použitých symbolů a zkratk	42
9.	Seznam obrázků	44
10.	Seznam příloh	45

1. ÚVOD

Cílem bakalářské práce je za pomoci sady měření hydrometrovací metodou při různých umístění měrného profilu a různých průtocích v oblasti, kde přechází kruhový profil na profil obdélníkový, a statistického vyhodnocení získaných výsledků stanovit velikost možné systematické chyby v hydrometrovacím měřícím procesu.

Ze získaných dat pak bude možné usoudit, jakou chybu je možné očekávat, pokud se hydrometrovací proces bude provádět v nevhodných podmínkách a také v jaké vzdálenosti se dají pokládat nastalé podmínky za vyhovující.

Základní motivací pro celý výzkum byl proces, který se provádí při posouzení funkční způsobilosti měřícího systému v terénních podmínkách.

Při této kontrole se provede sada měření v odtokovém žlabu, kde je měřidlo-nejčastěji vzdouvací objekt nainstalován. Bohužel v dnešní, kdy je prioritou snižování cen staveb a úspora místa, nebývá před těmito měrnými objekty dostatečně dlouhý otevřený kanál, proto je pro práci při celém procesu důležité vědět, v jaké vzdálenosti od vyústění trubky, v závislosti na jmenovitém průměru kruhového profilu, je očekávatelná chyba měření, případně v jaké vzdálenosti je již měření korektní.

Znalost těchto hodnot je důležitá pro celou správnost hydrometrovacího procesu, jinak hrozí nebezpečí, že celý proces je zatížen tak velkou chybou měření, která jej dělá naprosto nevěrohodným.

Hlavním cílem je zjednodušit práci posuzování funkční způsobilosti, případně napomoci při určení vhodného profilu k měření. Díky správné kalibraci nedochází k významným finančním ztrátám jak na straně původce odpadní vody, tak na straně státu, či spotřebitele. Neboť nesprávná kalibrace může zapříčinit nesprávné účtování množství vypouštění odpadních vod z podniků, měst a obcí. Také je zde nebezpečí způsobení poruch zařízení v provozech, kdy je do systému pouštěno malé nebo naopak velké množství vody, které poškozuje navazující zařízení.

Výstupem bakalářské práce budou grafy, které vymezují velikost chyb při různých variantách způsobu měření.

2. ZÁKLADNÍ POJMY

V následujícím textu budou uvedeny základy mechaniky tekutin, jejichž pochopení je důležité pro další navazující kapitoly práce, zejména pro pochopení vlastností proudových charakteristik v měřených tratích v laboratoři i in situ.

2.1. Průtočný průřez, průtok, průřezová rychlost

Pro pochopení celé problematiky je důležité ujasnit si některé pojmy, zvláště pak průtočný průřez, průtok a průřezová rychlost. Celá problematika se váže k průřezu proudového vlákna dS a a průtoku dQ proudovým vláknem. Kde dS je elementární ploška, která vznikne, pokud provedeme řez kolmý k proudnici a průtok dQ je objem kapaliny, který tímto průřezem projde za časovou jednotku, obvykle sekundu.

Vyjádření: Rychlost v průřezu 1-1 proudového vlákna je pro všechny částice u , takže za dobu dt urazí dráhu $dl = u \cdot dt$. Projde tedy tímto průřezem o ploše dS objem kapaliny $dS \cdot dl$. Přejdeme-li k jednotce doby, bude dráha $dl = u$. $l = u$ a průtok [5]

$$dQ = dS \cdot dl_1 = dS \cdot u \quad [m^3 / s] \quad (2-1)$$

Tímto je však vyjádřen pouze průtok objemový. Jsou zde však možnosti vyjádřit i průtok hmotnostní nebo tíhový, k jejich vyjádření vynásobíme $dS \cdot u$ hustotou a gravitačním zrychlením. Pro určení celého průtoku použijeme tento vztah:

$$Q = \int_S dQ = \int_S u \cdot dS \quad [m^3 / s] \quad (2-2)$$

Zde je Q objem kapaliny, jež projde průtočným průřezem za jednotku doby (obvykle sekundu) a S je plocha průtočného průřezu.

Průtočný průřez však nemusí být vždy jen rovinná plocha, protože pokud nejsou křivočará proudová vlákna souběžná, je nutno vzít za průtočný průřez řez proudu zakřivenou plochou k proudnicím. Také obvykle neznáme rozdělení rychlostí

v průtočném průřezu, jejich vyčíslení je obtížné až nemožné. Proto jsme nuceni zavést do výpočtů střední průřezovou rychlost v [m/s], která je definovaná vztahem

$$Q = \int_S u \cdot dS = v \cdot \int_S dS = v \cdot S \quad (2-3)$$

Ze vztahu (2-3) nám vychází rovnice pro střední průřezovou rychlost:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{\int_S u \cdot dS}{S} \quad [m/s] \quad (2-4)$$

2.2. Způsoby měření průtoku

Pro měření se dá využít několik způsobů, které se od sebe vzájemně liší náročností, přesností a délkou. V dnešní době se setkáváme s využitím moderních metod, například měření ultrazvukem nebo elektromagnetickou indukcí. Tyto postupy jsou však omezeny na podmínky se známými parametry, jako je tvar koryta a z něj vycházející výška hladiny a průtočné množství. Ostatní metody se zdají být více mechanické, avšak lidský faktor, který se zde významně projevuje, z nich může utvořit metody velmi přesné. Na druhou stranu musíme v tomto případě počítat i s opačnou variantou. Mechanické metody jsou využívány na velkých i malých tocích. Jako nejpřesnější z mechanických metod se zdá být metoda za použití hydrometrovacích vrtulí, která je také používána ke kalibraci výše zmíněných trvale instalovaných měřidel.

2.2.1. Do nádoby

Je to jedna z nejstarších metod měření průtoků. Princip je založený na zachytávání protékajícího množství do nádob (PVC, plech) menších rozměrů, většinou s objemem do 20 l, maximálně 100 l a měření příslušného času.

2.2.2. Pomocí hydrometrické vrtule

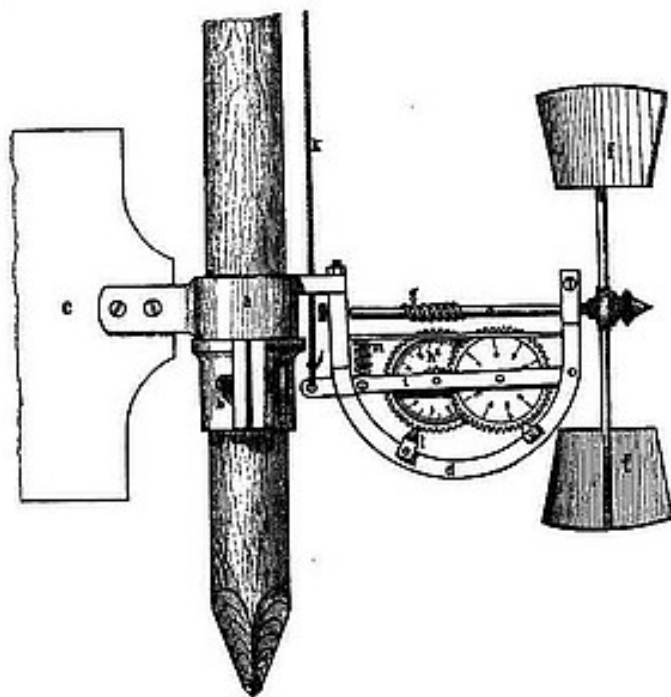
Toto měření spočívá v měření rychlosti proudění vody a následného zjišťování parametrů (hloubka, vzdálenost mezi svislicemi) pro výpočet plochy průtočného profilu. Pro provedení měření je důležité zvolit vhodný měrný profil, který by se měl umístit v úseku s volnou hladinou, v souměrném nejlépe rovném úseku koryta, v úseku

s dostatečnou hloubkou a bez bočních kontrakcí a vzduť hladiny. Takový úsek je většinou velmi problematické najít a proto se provádí dodatečná úprava jako je odstranění velkých kamenů, vegetace a podobně. Je také třeba dbát na vhodné umístění svislic tak aby, výsledek co nejvíce odpovídal skutečnosti.

Pro výpočet rychlostí a průtoků v profilu, který je měřený hydrometrovacími vrtulemi, je postup uveden v kap. 3.2, nebo také v [9].

2.2.2.1 Historie hydrometrování

Hydrometrovací vrtule byla poprvé navržena v roce 1787 R. Woltmannem. Měla horizontální osu s propelerem tvaru lopatkového kola se dvěma šikmými lopatkami a mechanickým počítadlem otáček. Tento přístroj začal být velmi záhy hojně využíván. V průběhu let se změnil tvar propelerů, kdy došlo k transformaci lopatkových kol na propelery šroubovicové (Trevianos 1820). Tento druh vrtule je používán dodnes



Obrázek 2.1: Původní Woltmannova vrtule

Dalším velkým objevem v oblasti hydrometrických vrtulí byl vynález profesora pražské techniky, švýcarského vědce Harlachera, který nahradil mechanické počítadlo elektrickým zařízením na signalizaci otáček. V roce 1875 přišel velký zlom v produkci

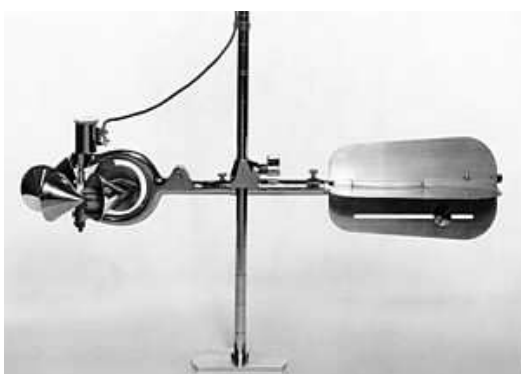
vtulí, protože roku 1873 založil v Bavorsku Albert Ott „Mathematisch-Mechanisches Institut A. OTT“, kde se až do dnešní doby vyrábí hydrometrovací vrtule.



Obrázek 2.2: Vrtule typu OTT-C-2

Během let se na trhu s hydrometrovacími vrtulemi vystříдалo několik výrobců, měli jsme i tuzemskou výrobu s názvem Metro, avšak do dnešních dob mimo OTT Messtechnik přečkala pouze SEBA.

Stejně jak v Evropě, tak i na Americkém kontinentu vývoj postupoval. Zde se prosadil v roce 1885 americký inženýr W.G. Price, který si patentoval typ vrtule, jež byl podobný přístroji pro měření rychlosti větru. Podstata byla ve svislé ose se šesti kornouty po obvodu.



Obrázek 2.3: Priceova vrtule

Obě dvě vrtule mají, jak jsem již popsala, dosti zásadní rozdíly. Je zde také důležité zmínit jejich výhody, ale také nevýhody. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma typy je

hlavně ve způsobu měření. Woltmannův typ má díky horizontální ose problém zaznamenat jiné proudění nežli to, které je rovnoběžné s osou, naopak Priceova vrtule je díky vertikální ose schopna zaznamenat proměnlivý směr proudění. Také se udává, že vrtule s horizontální osou mají při malých rychlostech větší nejistotu měření. Ale i přes tyto poměrně důležité faktory má Woltmannův typ řadu výhod a získává si stále větší oblibu i v oblastech, kde dříve převažovaly Priceovy vrtule. Je to i díky tomu, že výrobci dodávají vrtule s těly různých velikostí a stoupáním šroubovice, čímž se přístroje stávají velmi flexibilními a použitelnými v širokém spektru podmínek. Souběžně se změnou tvarů a vývojem elektroniky docházelo i ke změnám způsobu zaznamenávání impulzů až do dnešní podoby, kdy byla akustická zařízení nahrazena elektronickými čítači impulzů. Další informace o historii hydrometrovacích vrtulí v [6].

2.2.3. Pomocí indikátorových metod

Tento druh měření se využívá v nepříznivých hydraulických podmínkách, kde nelze využít hydrometrické vrtule, případně při speciálních případech. Při této metodě se značí část průtoku stabilními chemikáliemi nebo radionuklidy, které jsou pak sledovány v kontrolních profilech. Tento způsob je však naprosto nevhodný pro námi uvažované použití.

2.2.4. Nové metody při měření průtoků

Nové metody se začali vyvíjet v závislosti na technickém pokroku celé společnosti, protože měření pomocí předchozích metod bylo dosti časově náročné. Jako nejvhodnější se jeví využití ultrazvuku a elektromagnetické indukce.

Metoda ultrazvuková využívá elasticity a hustoty média, na kterém závisí rychlost zvukové vlny. Měří se tedy změna rychlosti a fázového posunu zvukového signálu v různých směrech proudění vody. Měření je ovlivněno teplotou a tlakem vody a koncentrací rozpuštěných látek ve vodě. Toto zařízení je v dnešní době instalováno na velkém množství míst – typickými jsou objekty na čistírnách a úpravnách vod, na

odtocích vod z průmyslových podniků apod. Pro měření je důležité znát parametry koryta. Ke kalibraci a kontrole správnosti měření je využíváno hydrometrovacích vrtulí.

Metoda elektromagnetické indukce je založena na indukci elektrického napětí ve vodiči (proud vody) při jeho pohybu v magnetickém poli (vytvářeno uměle kolmo na proudění vody). Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná proudění vody.[1]

2.3. Stanovení rychlosti

V našem případě se jedná o ustálené proudění vody v otevřeném korytě, které má pravidelný tvar. Pro tento případ použijeme na výpočet průřezové rychlosti Chézyho rovnici, která je nejjednodušším způsobem stanovení rychlosti v těchto podmínkách. Vycházíme ze vztahů

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (2-5)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad (2-6)$$

kde

C je rychlostní součinitel,

R je hydraulický poloměr,

i je sklon čáry energie,

S je průtočná plocha,

O je omočený obvod.

Při výpočtu Chézyho rovnicí se do omočeného obvodu nezapočítává hladina, protože má styk vody se vzduchem výrazně nižší tření než je tření vody o stěny koryta. Také rychlostní součinitel C není konstantní, je přímo závislý na tvaru průtočného průřezu, drsnosti stěn, případně i na sklonu. Nejčastější výpočet C je dle Pavlovského

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y \quad (2-7)$$

kde $y = 2.5 \cdot \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \cdot \sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.1)$ (2-8)

n je drsnostní součinitel,

R je hydraulický poloměr,

a dle Manninga

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} \quad (2-9)$$

n je drsnostní součinitel,

R je hydraulický poloměr.

Pokud je omočený obvod složen z různých drsností probíhá výpočet průměrné drsnosti dle vztahu

$$n = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot O_i}{O} \quad (2-10)$$

kde

n_i je dílčí drsnostní součinitele,

O_i je dílčí omočené obvody,

n je drsnostní součinitel,

O je celkový omočený obvod.

2.4. Stanovení průtočného množství

Pro stanovení průtočného množství v korytech s ustáleným prouděním je využívána rovnice spojitosti (kontinuity), která v podstatě vyjadřuje zákon zachování hmotnosti. Z předchozích vztahů jsem získala rychlost kapaliny a z dřívějších údajů je již známá plocha průřezu. Průtočné množství tedy získáme dle vztahu

$$Q = v \cdot S \quad (2-11)$$

kde

v je rychlost kapaliny,

S je plocha průřezu,

Q je průtočné množství.

3. MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN

3.1. Normy

Pro měření průtoku kapalin a proces hydrometrování existuje několik evropských i českých norem. Hlavní normou je ČSN ISO 2537 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem [2]. Dále pak novější mezinárodní norma ČSN EN ISO 748 Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků.[3]

Uvedené normy se odkazují na ISO 772 Hydrometrická měření – Terminologie.

3.2. Metoda rychlostního pole

Nyní se budu podrobněji zabývat metodou rychlostního pole. Metoda rychlostního pole je využívána jak v systémech tlakových, tak i v systémech s volnou hladinou.

V následujících odstavcích bude popsána pouze metoda pro systémy s volnou hladinou. Metodu pro otevřená koryta popisuje [9].

3.2.1. Princip metody rychlostního pole

Pomocí metody rychlostního pole je stanoven průtok, přičemž celá metoda je založena na integraci funkce rychlostního pole přes plochu průtočného průřezu S dle vztahu

$$Q = \int_S f(u_i) \cdot dS = \iint_S f(u_i) \cdot dx \cdot dy \quad (3-1)$$

kde

$f(u_i)$ je funkce rychlostního pole.

Obvykle funkci rychlostního pole stanovíme tak, že ve vhodně zvolených měrných bodech průtočného profilu jsou změřeny bodové rychlosti u_i , které jsou pak následně aproximovány vhodnou matematickou funkcí.[8]

Dle [3] je funkce stanovena a následně integrována po výšce měrného profilu, kde jsou stanoveny svislicové pásy, čímž dostáváme průměrnou svislicovou rychlost \bar{v} . Dále jsou pro získání průtočného množství hodnoty interpolovány. Postup je zapsán vztahem

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot \bar{v}_i \quad (3-2)$$

kde

Q stanovený průtok,

b_i šířka svislicového pásu,

h_i hloubka svislicového pásu,

\bar{v}_i průměrná rychlost na svislici,

m počet svislicových pásů.

Metoda, kterou jsem popsala výše se užívá nejčastěji pro kalibraci a kontrolu jiných měřidel. Je zde také značný rozptyl přesnosti, který je přímo závislý na kvalitě vstupních dat a na jejich množství. To znamená, že pokud se nám povede zajistit velké množství přesných dat, je chyba snížena na minimum. Naopak při nedostatečné síti měrných bodů a kvalitě provedení, velmi rychle narůstá velikost chyby.

V mém případě probíhalo měření bodových rychlostí vodoměrnými vrtulemi. Je to kontaktní metoda, která je používána do dnešní doby již od roku 1500, kdy první měření uskutečnil, dle dostupných pramenů, Leonardo da Vinci až do dnešní doby. V současné době je hydrometrování nejvyužívanější metodou pro stanovení průtoku ve vodním hospodářství. Důvodem je také to, že je to v podstatě jediné měřicí zařízení, které je schopno měřit rychlost proudu v podmínkách prizmatických koryt s volnou hladinou, kde protéká relativně znečištěná voda.

Každá vodoměrná vrtule má svůj vlastní vztah, který udává přepočtení mezi počtem otáček a rychlostí proudění. Tento vztah se nazývá kalibrační rovnice a udává se ve tvaru

$$u = \alpha_1 + \beta_1 \cdot n_f \quad (3-3)$$

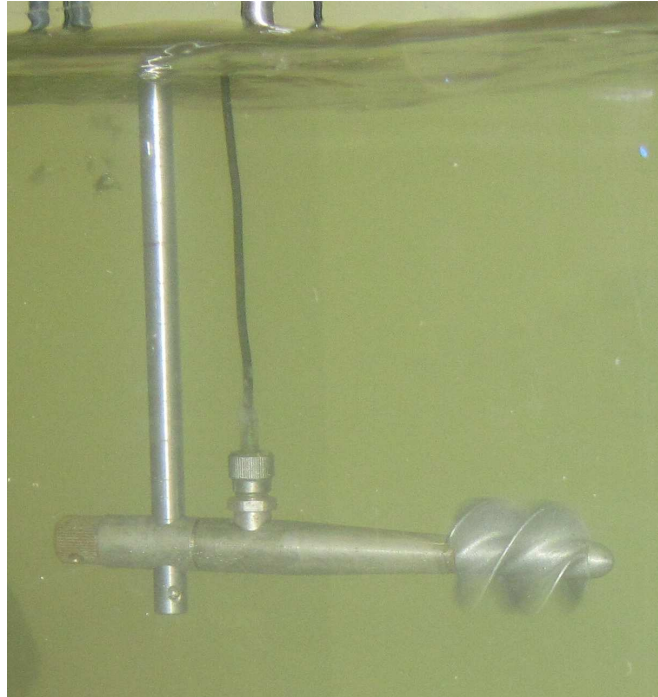
kde

u je rychlost proudu,

n_f je frekvence otáček

α_1, β_1 jsou konstanty uvedené v kalibračním listu vodoměrné vrtule (příloha L).

Přesnost měření vodoměrnou vrtulí závisí na různých faktorech, jako jsou typ vrtule, měřená rychlost, turbulence proudu, dobu měření, pozice vrtule a dalších.



Obrázek 3.0.1: Hydrometrovací vrtule typ OTT-C-2

4. NEJISTOTA MĚŘENÉ VELIČINY

Všechna měření fyzikální veličiny jsou zatížena nejistotami. Tyto jsou způsobeny systematickými chybami (vlivy) na použitém zařízení pro kalibraci a měření, nebo náhodnými rozptyly, například: nedostatečnou citlivostí použitého zařízení pro měření. Výsledek měření je tak pouze odhadem správné hodnoty měřené veličiny, a tudíž je úplný jen, když je doprovázen údajem o jeho nejistotě [3].

Rozdíl mezi správnou a měřenou hodnotou je chyba měření. Chyba měření, která nemůže být známá, způsobí nejistotu v přesnosti výsledku měření [3].

Chyba měření není způsobena jedním vlivem, ale je to kombinace složek chyb, které nastávají při daném procesu. Z toho důvodu je velikost chyby přímo závislá na složitosti měření a jeho dílčích složkách, protože celková chyba je kombinací jednotlivých chyb.

Nejistoty jsou kombinovány využitím statistických pravidel na kombinování směrodatných odchylek, udávající správné úvahy o korelacích mezi všemi chybami měření z různých zdrojů, aby se vypočítaly jak systematické, tak náhodné chyby. Výsledné hodnoty nejistoty jsou odsouhlasené standardní nejistoty; odpovídají jedné směrodatné odchylce rozdělení pravděpodobnosti chyb měření [3].

Podrobným popisem chyb i s návodem na jejich stanovení se zabývá [3], kde je také uvedeno několik typů chyb.

4.1. Všeobecně

Metoda měření spočívá v rozdělení příčného průřezu koryta, které se bere v úvahu, na pásy svislicemi a v měření šířky, hloubky a průměrné rychlosti spojených s každou svislicí.

Průměrná rychlost \bar{v}_i na každé svislici je vypočtena z měření bodové rychlosti provedených v každé z různých hloubek na svislici. Průtok se počítá dle vztahu (3-2).

Všechny informace v následujících kapitolách 4.2, 4.3 a 4.4 jsou čerpány z [3] a [10].

4.2. Přídavné nejistoty

Relativní kombinovaná standardní nejistota v měření [%] je dána vztahem (4-1):

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i)^2 (u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{\bar{v},i}^2)}{\left(\sum_{i=1}^m (b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i)\right)^2} \quad (4-1)$$

kde

$u(Q)$ je relativní kombinovaná standardní nejistota průtoku,

$u_{b,i}$, $u_{d,i}$, $u_{\bar{v},i}$ je relativní standardní nejistoty [%] šířky, hloubky a průměrné rychlosti měřené na svislici i ,

u_s nejistota způsobená nestálou odezvou vodoměrné vrtule (u_{cm}), měřiče šířky (u_{bm}) a hloubky sondou (u_{ds}).

$$u_s = \sqrt{u_{cm}^2 + u_{bm}^2 + u_{ds}^2} \quad (4-2)$$

Pro tento výraz může být brána odhadnutá praktická hodnota 1%.

u_m nejistota způsobená omezeným počtem svislic a

m počet svislic

Průměrná rychlost \bar{v}_i na svislici i je odhad průměru měření bodů rychlosti provedených v jedné nebo více hloubkách na svislici. Nejistota v \bar{v}_i se vypočítá následovně:

$$u(\bar{v}_i)^2 = u_{p,i}^2 + \left(\frac{1}{n_i}\right)(u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \quad (4-3)$$

kde

$u_{p,i}^2$ nejistota průměrné rychlosti \bar{v}_i způsobená omezeným počtem hloubek, v nichž jsou provedena měření na svislici i ;

n_i počet hloubek na svislici i , v nichž jsou provedena měření rychlosti;

$u_{c,i}$ nejistota rychlosti při zvláštním bodu měření na svislici i způsobená nedostatkem reprodukce vodoměrné vrtule;

$u_{e,i}$ nejistota bodové rychlosti ve zvláštní hloubce na svislici i způsobená fluktuacemi rychlosti (pulzacemi) v proudu během doby expozice vodoměrné vrtule.

Kombinace vztahů (4-1) a (4-3) poskytuje (4-4):

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)^2 \left(u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{p,i}^2 \left(\frac{1}{n_i} \right) (u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \right)}{\left(\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i) \right)^2} \quad (4-4)$$

Jestliže měření svislicemi jsou umístěna tak, že jsou si pásy průtoků (b_i, d_i, v_i) přibližně rovny a složky nejistot jsou rovnocenné od svislice ke svislici, potom je vztah (4-4) zjednodušen na [3]:

$$u(Q)^2 = \left[u_m^2 + u_s^2 + \left(\frac{1}{m} \right) \left(u_b^2 + u_d^2 + u_p^2 + \left(\frac{1}{n} \right) (u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \right) \right]^{1/2} \quad (4-5)$$

4.3. Nejistota typu A

Metoda vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny spočívá ve statistické analýze opakování sérií měření. Vycházíme-li z toho, že je n_p nezávislých stejně přesných pozorování $n_p > 1$, tak pak bude odhad výsledné hodnoty y reprezentován hodnotou aritmetického průměru, vypočítaného zcela stejně jako u případu chyb, dle tohoto vztahu

$$\bar{x} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4-6)$$

Nejistota příslušející k danému odhadu y se vypočítá jako směrodatná odchylka výběrového průměru, tedy

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n_p - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_p - 1}} \quad (4-7)$$

Nejistota se v tomto typu obvykle značí u_{Ay} , tudíž při použití vztahu

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n_p}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_p (n_p - 1)}} \quad (4-8)$$

můžeme konstatovat, že tato nejistota je zapříčiněna nestálostí zjištěných hodnot. Je-li provedeno málo měření cca < 10 , je určení výsledné hodnoty málo spolehlivé a raději se přikláníme k odhadnutí metodou B (kap. 4.3.), která je založena na jiném základě než jsou výpočty z naměřených hodnot.

4.4. Nejistota typu B

Zjištění a následně vyhodnocení standardních nejistot vstupních veličin metodou typu B je, jak již bylo výše zmíněno, založeno na jiných než statistických přístupech k vyhodnocení sérií měření. Metoda B, se nevyznačuje jednoznačnou souvislostí, jak by se mohlo zdát, ale je zde možno odhadnout i vliv náhodných chyb, například chyb při kalibraci s využitím minulých měření, mezi něž nejčastěji patří.

- údaje výrobce měřící techniky
- zkušenosti z předchozích sérií měření
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů
- nejistoty referenčních údajů v příručkách [10]

Dílčí nejistoty jednotlivých zdrojů u_{Bzi} vedou k určování nejistoty metodou typu B. Známe-li maximální odchylku j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , určí se nejistota u_{Bzj} dle vztahu

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (4-9),$$

kde

k je součinitel ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí.

V některých případech je hodnota standardní nejistoty známa např. z kalibračního certifikátu měřidla .

Výpočet výsledné nejistoty provedeme dle vztahu

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 \cdot u_{Bzj}^2} \quad (4-10)$$

kde

u_{Bzj} jsou nejistoty jednotlivých zdrojů

A_j jejich součinitele citlivosti

Tímto vztahem nejistota vyjádřená metodou B získá charakter směrodatné odchytky.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Pro získání dostatečného množství údajů bylo nutné vytvořit příslušné množství měření, které by vytvořilo základ pro výpočet a následné vyvození výsledků. Pro práci byla použita měrná trať LVV fakulty stavební a další hardwarové a softwarové vybavení k této práci náležející.

5.1. Průběh práce

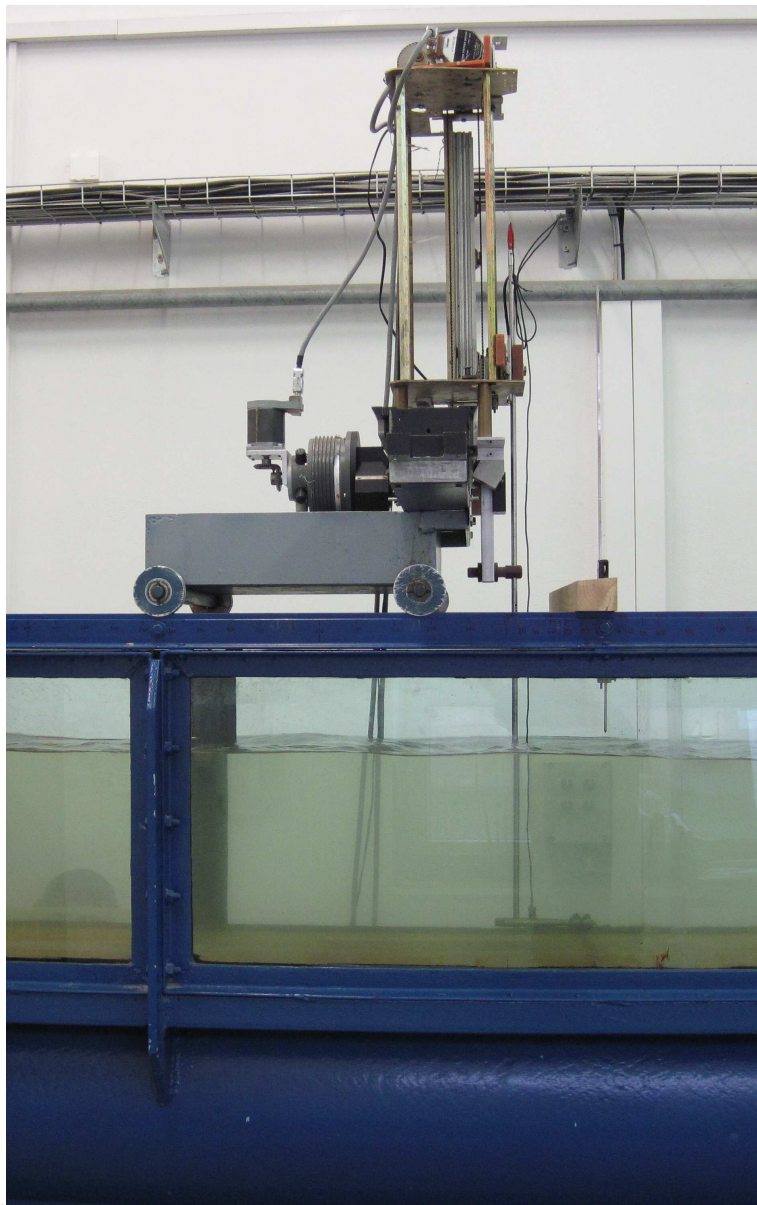
Jako hlavní bylo nutné určit, za jakých parametrů bude práce probíhat. Nejprve byl zvolen sklon žlabu a to v hodnotách 0.00%, 0.25% a 0.50%. Dále byla zvolena sada průtoků, při kterých bylo provedeno měření. První měření bylo provedeno při sklonu 0.00% a průtoku 30 l/s v 5-ti profilech. Po prvním měření a zpracování výsledků byly navrženy zbylé průtoky a to 6, 8, 15, 30 a 50 l/s. Měření probíhalo v sedmi profilech. Volba jejich pozice byla korigována na základě výsledků z první sady měření. Profily byly určeny jako poměrná vzdálenost od ústí k průměru trubky (tj. DN380). Byly určeny následující vzdálenosti 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.8, 3.5DN. Tyto vzdálenosti byly voleny tak, aby co nejpřesněji charakterizovaly změnu proudění v přechodu kruhového profilu do profilu obdélníkového. Jako poslední upřesnění parametrů padlo při určení délky měření v každém bodě, aby mělo dostatečnou přesnost, ale zároveň umožnilo provést měření ve vymezeném čase, který byl k dispozici. Bylo rozhodnuto, že měření bude probíhat ve 30 sekundových intervalech a v celém profilu dvakrát opakováno.

Po zvolení všech výše uvedených parametrů začala měřící práce. Jednotlivé výsledky měření byly průběžně zpracovány, aby se odhalily případné chyby, které by mohly nastat při měření.

Veškeré údaje o dnech, průtocích, sklonech a výškách hladin byly zaznamenávány do nachystaného formuláře a tím byla usnadněna práce při vyhodnocování a ukládání dat.

5.1.1. Použité vybavení

Pro měření byla využita měrná trať LVV v budově F fakulty stavební Vysokého učení technického, kde bylo nainstalované měřicí zařízení i s napojením na softwarovou podporu.



Obrázek 5.1: Měřicí zařízení

Měřicí zařízení se skládalo z vrtule typu OTT-C-2, tyče na které byla vrtule přichycena a posuvného mechanismu, který sám na základě pokynů softwaru prováněl posuny mezi jednotlivými měrnými body v profilu. K pohybu mezi jednotlivými měrnými profily sloužil pojezdový vozík pod celým mechanismem. Posun mezi jednotlivými profily byl

prováděn ručně. Při každém měření bylo nutné změřit výšku hladiny, která hrála roli i při určování rozložení měrných bodů v průřezu, aby bylo co možná nejrovnoměrnější a tím vznikala co nejmenší chyba měření.

5.1.2. Parametry měrné trati

Měření probíhalo, jak již bylo uvedeno výše, na měrné trati LVV. Hydraulický žlab je možno naklonit a tím změnit sklon dna.



Obrázek 5.2: Možnost nastavení sklonu žlabu

Což nám umožnilo provést všechna měření na jedné trati. Šířka žlabu po celé délce je 0.414 m. Do žlabu byla vložena trubka DN380 délky 5 m se zaobleným nátokem na vstupu. Toto uspořádání zajistilo na výstupu z trubky vytvoření obvyklých proudových podmínek na konci dlouhého potrubí a v zájmovém prostoru bylo možno sledovat pouze změny způsobené rozšířením profilu.



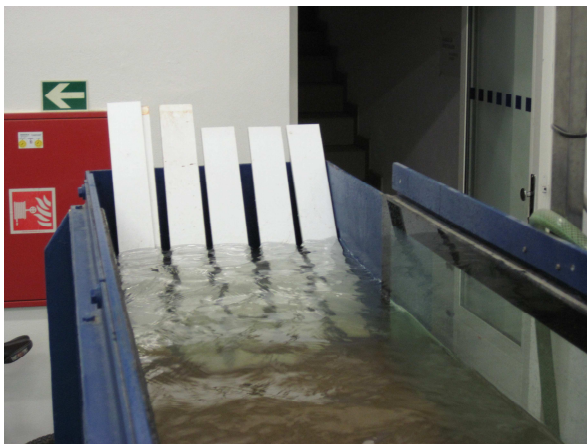
Obrázek 5.3: Pohled do profilu proti proudu



Obrázek 5.4: Pohled na trubku od vtoku

Trubka byla žlabu pevně ukotvena, aby nedocházelo k posunům, které by mohly být způsobeny množstvím proudící vody. Další důležitou součástí celé soustavy je možnost nastavení vzduší hladiny ve sledované oblasti. V průběhu celého experimentu byly pro

jednotlivé průtoky nastavovány takové úrovně hladin, jako by byl za posledním měrným profilem byl nainstalován Parshallův měrný žlab. Celé vzduší bylo nastaveno pomocí zatarasění odtoku (Obrázek 5.5).



Obrázek 5.5: Úprava vzduší hladiny

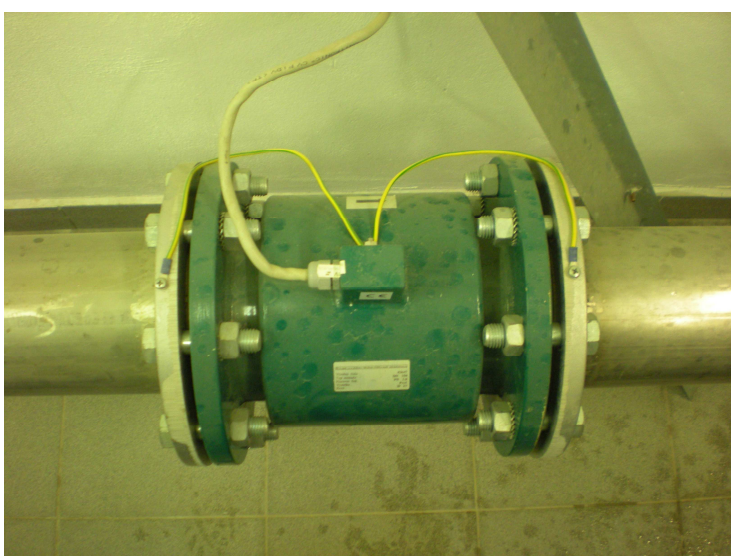
Nedílnou součástí trati byl ovladač, kterým bylo možno nastavit množství protékané vody. Dále byl umístěn zde indukční průtokoměr skutečně proteklé vody, který zobrazoval okamžité hodnoty na display své vyhodnocovací jednotky.



Obrázek 5.6: Ovládací panel



Obrázek 5.7: Vyhodnocovací jednotka indukčního průtokoměru



Obrázek 5.8: Indukční průtokoměr nainstalovaný na přívodním potrubí

V celé laboratoři je pro měření využívána pitná voda z veřejného vodovodu. Aby nedocházelo k zbytečnému plýtvání a aby bylo možno uspokojit požadavky na vysoké průtoky, je pod laboratoří zásobní nádrž. Z této nádrže je voda čerpána a také se do ní vrací. Při měření se tedy pracuje se stále stejným objemem vody. Není tedy nutno odebírat stále novou pitnou vodu ze sítě, stačí pouze udržovat konstantní množství vody v nádrži.

5.1.3. Ovládání měřícího procesu

Pro měření byla na zařízení vrtule a pojezdu připojena řídicí jednotka a notebook, který má nainstalovaný software, přes který bylo možné řídit celý měřící proces, včetně

nastavení výchozí polohy vrtule. V programu bylo potřeba nastavit hloubku vody, počet svislic, počet horizontál, čas měření a počet opakování měření. Systém po startu již sám vypočítá polohu jednotlivých měřících bodů. Po zadání všech potřebných údajů už bylo měření provedeno bez obsluhy. Provádělo se pouze nastavení vzdálenosti vrtule od ústí trubky a nastavení parametrů, které byly zmíněny již výše.

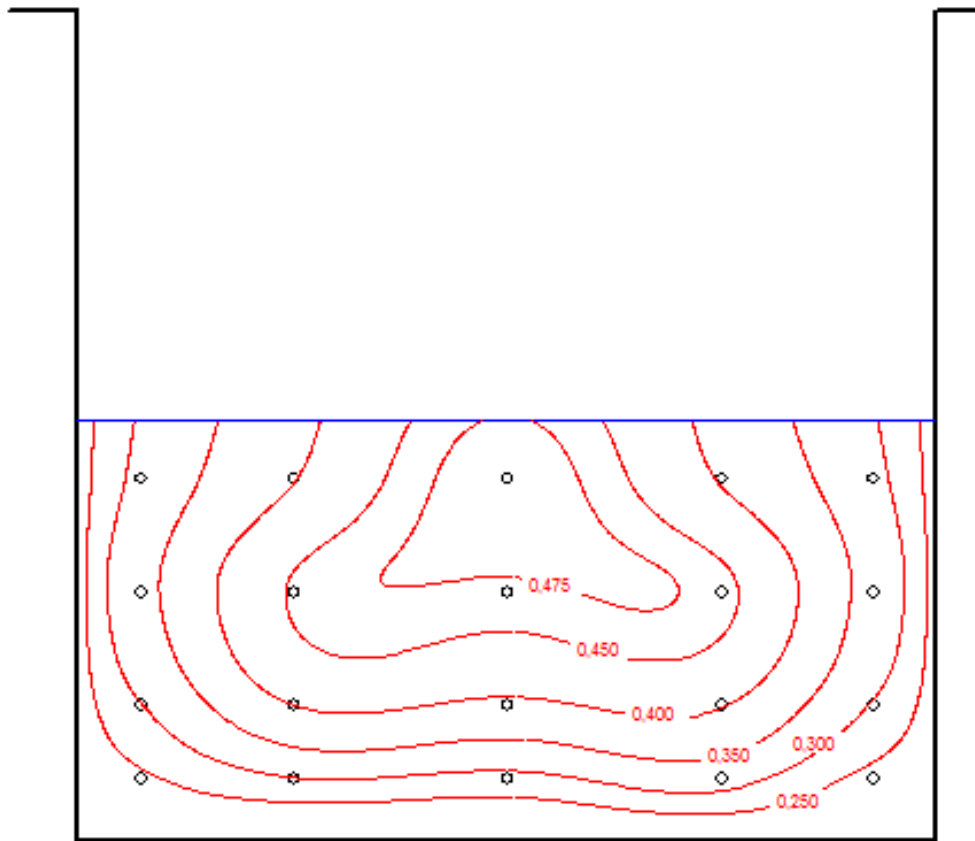
5.1.4. Parametry měření

Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.1 měření probíhala při třech různých sklonech 0.00, 0.25 a 0.50% a pěti různých průtocích 6, 8, 15, 30 a 50 l/s. Dále bylo zvoleno 7 měrných profilů ve vzdálenostech, které odpovídaly násobkům průměru kruhového profilu 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.8 a 3.5DN. Znamená to, že bylo měřeno ve vzdálenosti 114, 228, 380, 570, 760, 1045 a 1330 mm od vyústění trubky. Bodové rychlosti byly měřeny v pěti svislicích. Počet horizontál byl volen dle průtoku od dvou do čtyř horizontál.

5.2. *Vyhodnocení hydrometrování*

Po změření všech údajů bylo potřeba vyhodnotit měření. Vyhodnocování probíhalo v programech HYDRO 1, EXCEL a SURFER 6.

Nejprve se všechna měření musela importovat do editoru programu HYDRO 11 a doplnit výšky hladiny u jednotlivých měření. Jako další krok se v hlavní části programu HYDRO 11, vypočítal změřený průtok. Zde bylo důležité zkontrolovat průběh izotach (Obrázek 5.9), aby bylo možné rozpoznat případné chyby v měření.

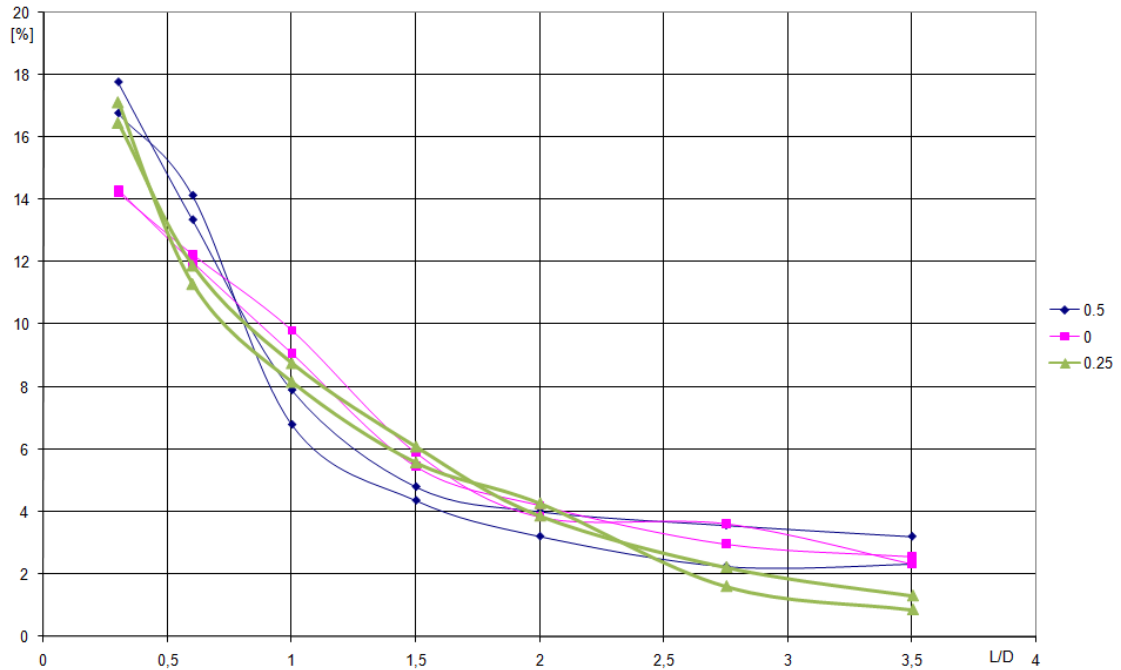


Obrázek 5.9: Příklad rozložení izotach; měrný profil 2.8D, sklon 0.00%, $Q=30\text{l/s}$, $H=0.203\text{m}$

5.2.1. Stanovení odchylky měření

Pro stanovení odchylky průtoku získaného hydrometrováním jsem uspořádala změřené výsledky do tabulky a stanovila procentuální odchylky od skutečného průtoku zjištěného z měřiče nainstalovaného na přívodním potrubí do žlabu. V toto chvíli jsem se snažila najít jednoznačnou závislost mezi vzdáleností od ústí a chybou měření. Jak ukazuje příklad na následujícím grafu, závislost existuje, ale je poněkud komplikovaná.

Graf 5.1: Odchylky při 15l/s pro různé sklony žlabu

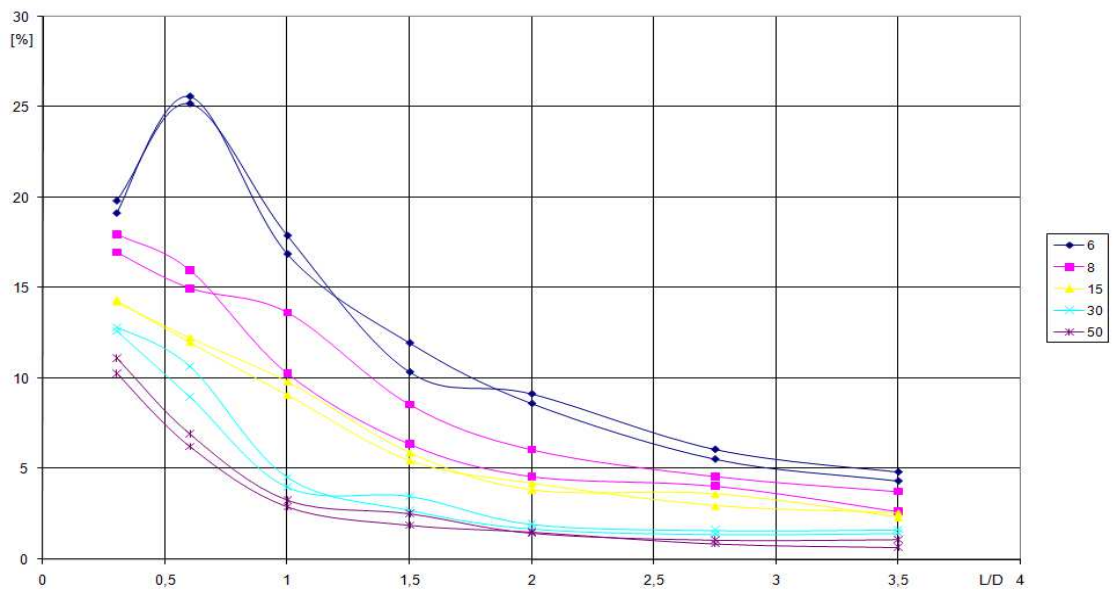


Grafy všech průtoků jsou vloženy jako příloha A, B, C, D, E.

Na základě těchto grafů nejsme schopni jednoduše a univerzálně určit přibližnou chybu měření v závislosti na vzdálenosti od ústí kruhového profilu.

Také byly vytvořeny grafy, které sjednocovaly všechny průtoky při jednom sklonu.(přílohy F, G, H; graf 5.2)

Graf 5.2: Odchylky při 0.00% sklonu žlabu pro různé průtoky



Jako další cesta se zdálo vhodné stanovit závislost chyby měření na Coriolisově nebo Boussinesquově kritériu.

5.2.2. Coriolisovo kritérium

Coriolisovo kritérium α , nazývané také koeficient kinetické energie (energy coefficient) udává míru nerovnoměrnosti rozdělení bodových rychlostí ve sledovaném profilu vzhledem ke střední profilové rychlosti [11].

Nejlepší výpovědní hodnotu má sice v uzavřených kruhových profilech s tlakovým prouděním (v otevřených profilech je problém s nepravidelným profilem a různými drsnostmi), ale díky pravidelnému tvaru a konstantní drsnosti měrného žlabu má i v mém případě dostatečnou vypovídací hodnotu.

Coriolisovo kritérium se vypočítá dle

$$\alpha = \frac{\int u^3 \cdot dS}{v^3 \cdot S} \quad (5-1)$$

kde

u je bodová rychlost,

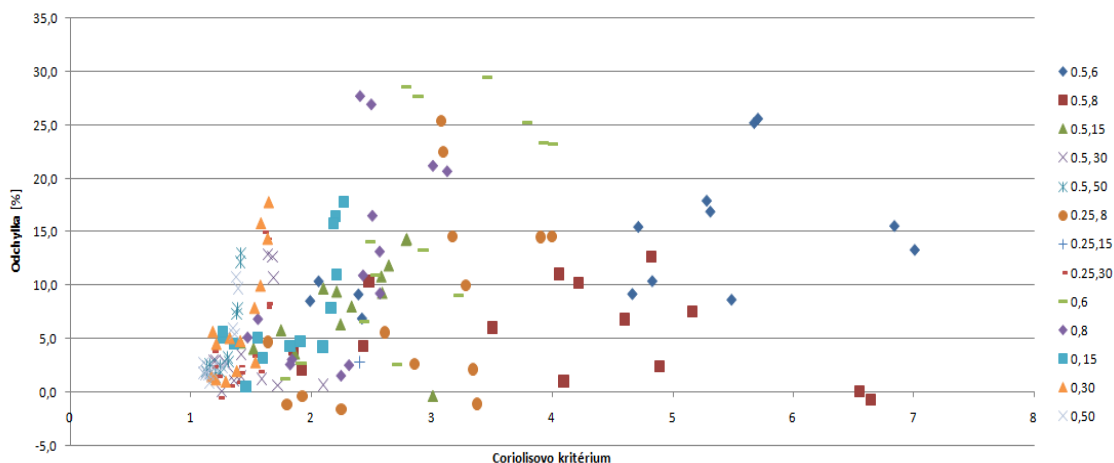
dS je plocha náležící danému bodu,

v je průřezová rychlost,

S je plocha průřezu.

Výsledky byly po výpočtu vyneseny do grafu (Graf 5.3, Příloha I)

Graf 5.3: Závislosti odchylky hydrometrování od skutečného průtoku na Coriolisovo kritériu



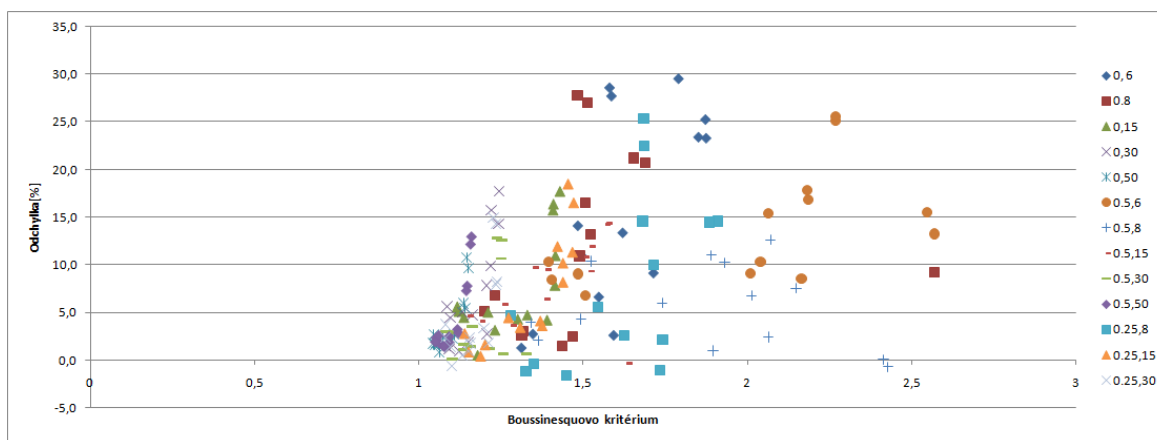
5.2.3. Boussinesquovo kritérium

Boussinesquovo kritérium β neboli součinitel hybnosti je součástí kvadratické funkce průřezové rychlosti. Řídí se obdobnými pravidly jako Coriolisovo kritérium. Výpočet Boussinesquova kritéria je dle

$$\beta = \frac{\int u^2 \cdot dS}{v^2 \cdot S} \quad (5-2)$$

Závislost odchylky výsledků hydrometrování na Boussinesquově kritériu β přineslo obdobné výsledky jako v případě Coriolisova kritéria (graf 5.4; příloha J)

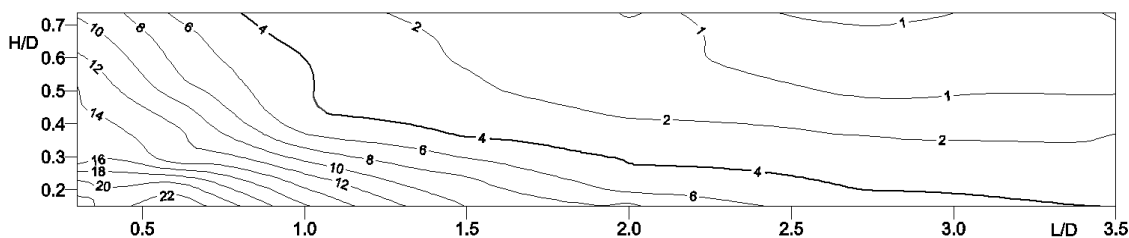
Graf 5.410: Závislost odchylky hydrometrování od skutečného průtoku na Boussinesquovo kritériu



5.2.4. Zpracování ve 3D závislosti

Protože ani jeden z dosavadních výstupů nepřinesl jednoznačné výstupy, které by byly vhodné na vyvození závěru, rozhodla jsem se pro nový pohled na věc. Použila jsem program Surfer 6, který mi umožnil vytvořit grafy trojrozměrné závislosti. Vytvořila jsem nejprve tři grafy, každý graf zvlášť pro jednotlivé sklony trati. Na spodní osu jsem umístila vzdálenost od ústí vyjádřenou v násobcích průměru kruhového profilu, na svislou osu jsem umístila relativní výšku hladiny a třetí rozměr jsou izolinie odchylky příslušných hydrometrovaných průtoků (příloha K). Na závěr jsem sestavila jeden graf pro všechny průtoky i sklony dohromady (graf 5.5; příloha L).

Graf 5.5: Graf závislosti odchylky hydrometrovaného průtoku [%] od skutečnosti na relativní hloubce a relativní vzdálenosti od vyústění trubky



6. ZÁVĚR

Cílem práce bylo zjistit v jaké vzdálenosti od přechodu z kruhového profilu do profilu obdélníkového je měření již dostatečně přesné a s jakými odchylkami je třeba počítat při nedodržení dostatečných vzdáleností.

V rámci práce jsem uskutečnila 182 hydrometrování. Při těchto měřeních jsem se seznámila se zařízením laboratoře, které bylo využito k měření. Také jsem se naučila převést poznatky z laboratorního měření k použití při měření v terénu.

Díky práci na vyhodnocování jsem se naučila pracovat se softwarovou podporou pro danou problematiku. Bylo důležité naučit se určit, zda dané výsledky měření jsou věrohodné, či jsou ovlivněny tak velkou chybou měření, která by mohla ovlivnit všechny výsledky.

Předem uvažované postupy zpracování nevedly k přesvědčivým výsledkům. Až zpracováním v trojrozměrné závislosti (přílohy L, M) jsem dospěla k dostatečně názornému závěru, že přesnost hydrometrování je výrazně závislá nejen na vzdálenosti od vyústění trubky, ale také na aktuální hloubce. Při extrémně malé hloubce může být i vzdálenost 3DN nedostačující. V případech, kdy není možno dodržet vhodnou vzdálenost, je nutno posoudit na základě grafu (příloha L), jaká je reálná výše odchylek a zda je měření v těchto podmínkách vůbec žádoucí, případně s jakou chybou je potřeba počítat.

Chyby ve stanovení průtoků se mění nejen v závislosti na vzdálenosti a hloubce, ale také v závislosti na sklonu žlabu, avšak podstatně méně významně.

Pro prokázání míry závislosti či nezávislosti na sklonu žlabu by bylo nutno provést další velké množství měření.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRÍŽ, Vladislav et al. *Hydrometrie*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988, 176 s. 14-512-88.
- [2] ČSN ISO 2537. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [3] ČSN EN ISO 748. *Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [4] ČSN EN ISO 772 (259300). *Hydrometrická měření – Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [5] BOOR, Boris, Jiří KUNŠTÁTSKÝ a Cyril PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1968.
- [6] Hydrometrické vrtule. In: *Výzkumný ústav vodohospodářský TGM: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cksvv.vuv.cz/hydrometricke-vrtule>
- [7] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: Modul 01*. Brno: CERM, 2006.
- [8] ŽOUŽELA, Michal. *Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou: disertační práce k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.) ve studijním programu (oboru) Vodní hospodářství a vodní stavby 36-35-9*. Brno: Vysoké učení technické, 2005. 105 s., il.:. Disertační práce. VUT, FAST, Ústav vodních staveb, Laboratoř vodohospodářského výzkumu.
- [9] ČSN 25 9312. *Měření průtoků kapalin v korytech, Metody rychlostního pole, Zjišťování celkové chyby*. Praha: Český normalizační institut, 11/1994.

- [10] PALENČÁŘ, Rudolf. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2001, 7-8, s. 5 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>
- [11] TUREČEK, Jan. Stanovení Coriolisova kritéria v otevřeném korytě. *Vysoké učení technické, Fakulta stavební* [online]. s. 5 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/03_Vodni%20hospodarstvi%20a%20vodni%20stavby/3_01_Vodni%20hospodarstvi%20a%20vodni%20stavby/Turecek_Jan.pdf

8. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

dQ	[m ³ /s]	průtok proudovým vláknem
dS	[m ²]	plocha průřezu proudového vlákna
u	[m/s]	rychlost částic průřezu, bodová rychlost
Q	[m ³ /s]	průtok
v	[m/s]	rychlost
S	[m ²]	plocha
dl	[m]	dráha
C	[m ^{0.5} /s]	rychlostní součinitel
R	[m]	hydraulický poloměr
i	[-]	sklon čáry energie
O	[m]	omočený obvod
n	[-]	součinitel drsnosti
n_i	[-]	dílčí součinitel drsnosti
O_i	[m]	dílčí omočený obvod
$f(u_i)$	[-]	funkce rychlostního pole
u_i	[m/s]	dílčí bodové rychlosti
b_i	[m]	šířka svislicového pásu
h_i	[m]	hloubka svislicového pásu
\bar{v}_i	[m/s]	průměrná rychlost na svislici
m	[-]	počet svislicových pásů
α_1, β_1	[-]	konstanty uvedené v kalibračním listu vodoměrné vrtule
n_f	[-]	frekvence otáček
$u(Q)$	[-]	relativní kombinovaná standardní nejistota průtoku

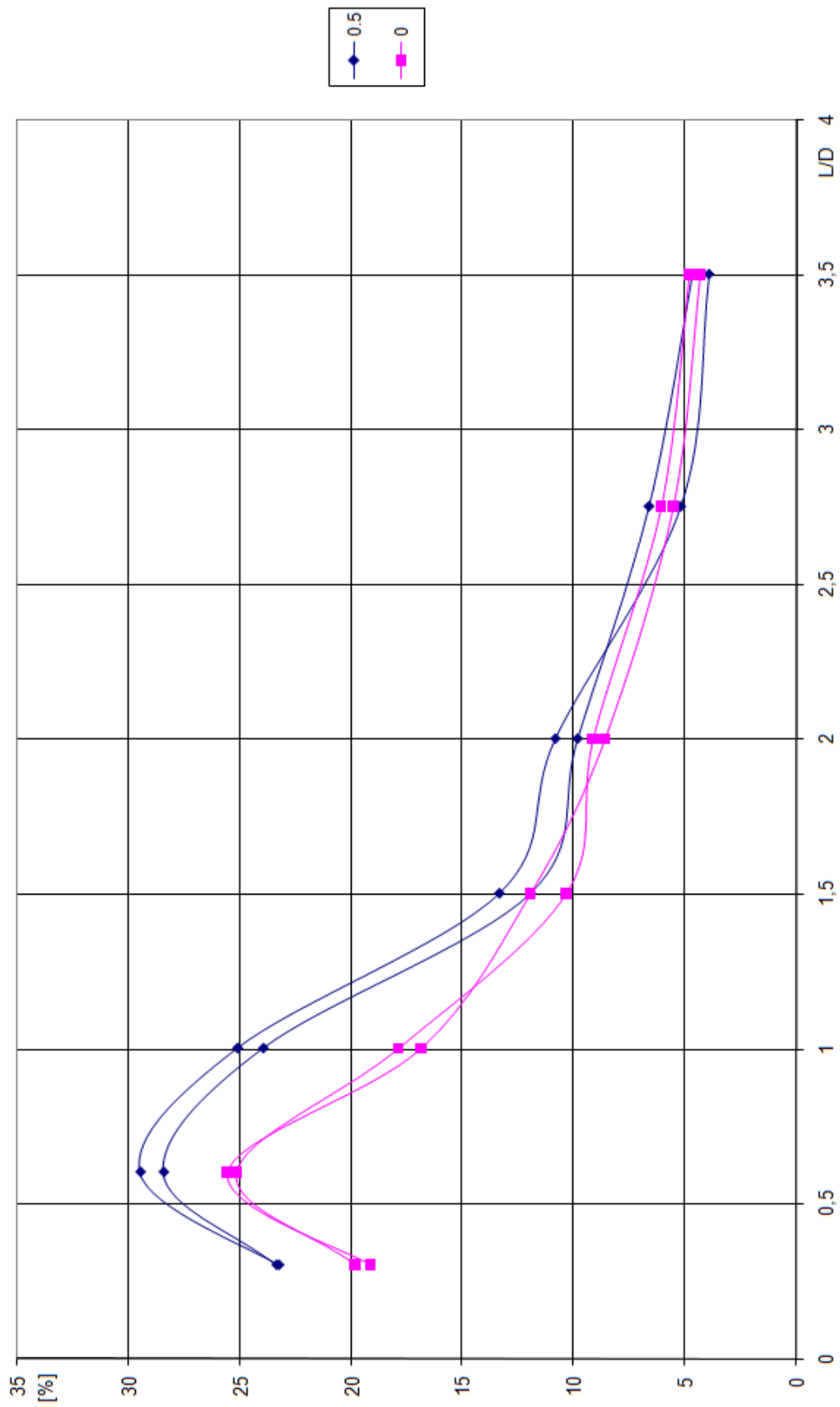
$u_{b,i}$ $u_{d,i}$ $u_{\bar{v},i}$	[-]	relativní standardní nejistoty [%] šířky, hloubky a průměrné rychlosti měřené na svislici i
u_s	[-]	nejistota způsobená nestálou odezvou vodoměrné vrtule (u_{cm}), měřiče šířky (u_{bm}) a hloubky sondou (u_{ds})
u_m	[-]	nejistota způsobená omezeným počtem svislic
$u_{p,i}^2$	[-]	nejistota průměrné rychlosti \bar{v}_i způsobená omezeným počtem hloubek, v nichž jsou provedena měření na svislici i
n_i	[-]	počet hloubek na svislici i , v nichž jsou provedena měření rychlosti
$u_{c,i}$	[-]	nejistota rychlosti při zvláštním bodu měření na svislici i působená nedostatkem reprodukce vodoměrné vrtule
$u_{e,i}$	[-]	nejistota bodové rychlosti ve zvláštní hloubce na svislici i způsobená fluktuacemi rychlosti (pulzacemi) v proudu během doby expozice vodoměrné vrtule
n_p	[-]	počet nezávislých stejně přesných pozorování
\bar{x}	[-]	aritmetický průměr
s	[-]	směrodatná odchylka výběrového průměru
u_{Ay}	[-]	značení daného typu nejistoty
u_{Bzj}	[-]	nejistota zdroje
z_{jmax}	[-]	maximální odchylka j -tého zdroje
k	[-]	součinitel ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí
u_{Bzj}	[-]	nejistoty jednotlivých zdrojů
A_j	[-]	součinitele citlivosti nejistoty jednotlivých zdrojů
α	[-]	Coriolisovo kritérium
β	[-]	Boussinesquovo kritérium
LVV		Laboratoř vodohospodářského výzkumu

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

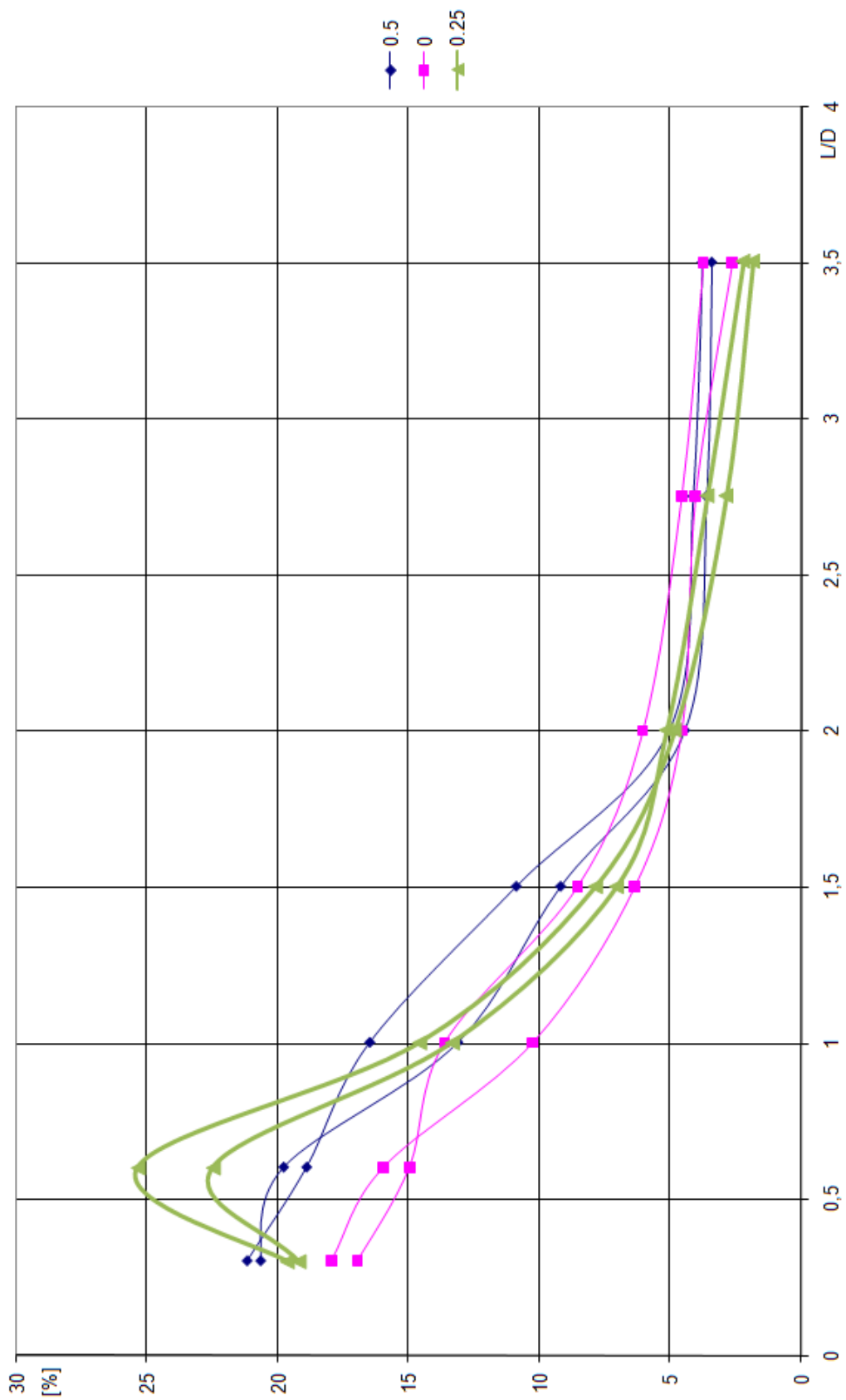
Obrázek 2.1: Původní Woltmannova vrtule [6]	14
Obrázek 2.2: Vrtule typu OTT-C-2 [foto:M. Jurčová]	15
Obrázek 2.3: Priceova vrtule [6]	15
Obrázek 3.0.1: Hydrometrovací vrtule typ OTT-C-2 [foto:M. Jurčová]	22
Obrázek 5.1: Měřicí zařízení [foto:M. Jurčová]	29
Obrázek 5.2: Možnost nastavení sklonu žlabu [foto:M. Jurčová]	30
Obrázek 5.3: Pohled do profilu proti proudu [foto:M. Jurčová]	30
Obrázek 5.4: Pohled na trubku od vtoku [foto:M. Jurčová]	30
Obrázek 5.5: Úprava vzdutí hladiny [foto:M. Jurčová]	31
Obrázek 5.6: Ovládací panel [foto:M. Jurčová]	31
Obrázek 5.7: Vyhodnocovací jednotka indukčního průtokoměru [foto:M. Jurčová]	32
Obrázek 5.8: Indukční průtokoměr nainstalovaný na přívodním potrubí [foto:M. Jurčová]	32
Obrázek 5.9: Příklad rozložení izotach; měrný profil 2.8D, sklon 0.00%, $Q=30\text{l/s}$, $H=0.203\text{m}$ [foto:M. Jurčová]	34

10. SEZNAM PŘÍLOH

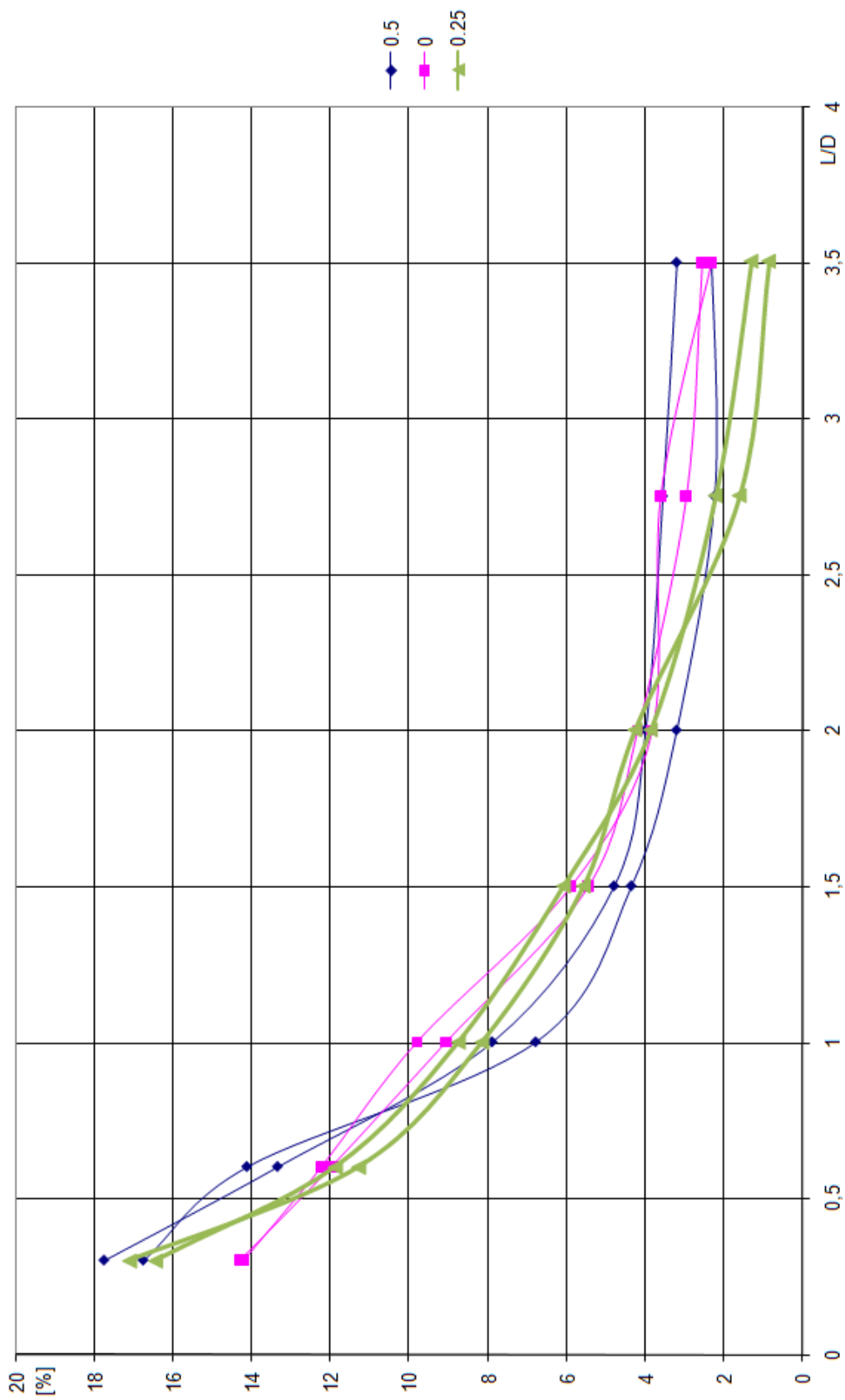
Příloha A	Graf odchylek průtoků při 6 l/s, v legendě jsou sklony žlabu
Příloha B	Graf odchylek průtoků při 8 l/s, v legendě jsou sklony žlabu
Příloha C	Graf odchylek průtoků při 15 l/s, v legendě jsou sklony žlabu
Příloha D	Graf odchylek průtoků při 30 l/s, v legendě jsou sklony žlabu
Příloha E	Graf odchylek průtoků při 50 l/s, v legendě jsou sklony žlabu
Příloha F	Graf odchylek při sklonu 0.00%, v legendě jsou hodnoty průtoků
Příloha G	Graf odchylek při sklonu 0.25%, v legendě jsou hodnoty průtoků
Příloha H	Graf odchylek při sklonu 0.50%, v legendě jsou hodnoty průtoků
Příloha I	Graf Coriolisova kritéria, legenda je ve tvaru: sklon[%], průtok [l/s]
Příloha J	Graf Boussinesquova kritéria, legenda je ve tvaru: sklon[%], průtok [l/s]
Příloha K	Grafy závislosti odchylky hydrometrování [%] od skutečnosti v závislosti na relativní hloubce a relativní vzdálenosti od vyústění trubky. Sklony zleva 0.00%, 0.25%, 0.50% a všechna měření.
Příloha L	Graf závislosti odchylky hydrometrování [%] od skutečnosti v závislosti na relativní hloubce a relativní vzdálenosti od vyústění trubky. Všechna měření.
Příloha M	Kalibrační list použité vrtule



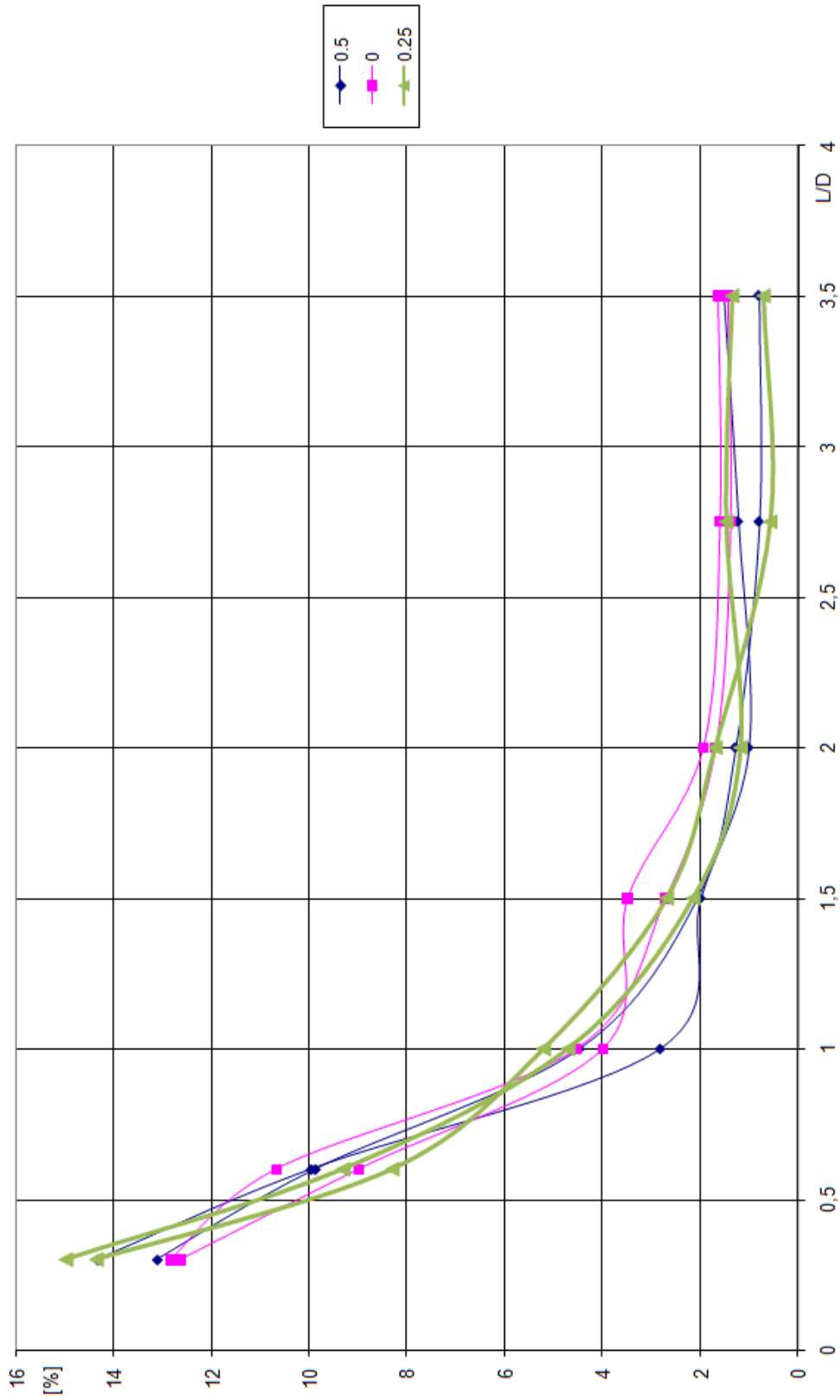
Příloha A: Graf odchylek průtoků při 6 l/s, v legendě jsou sklony žlabu



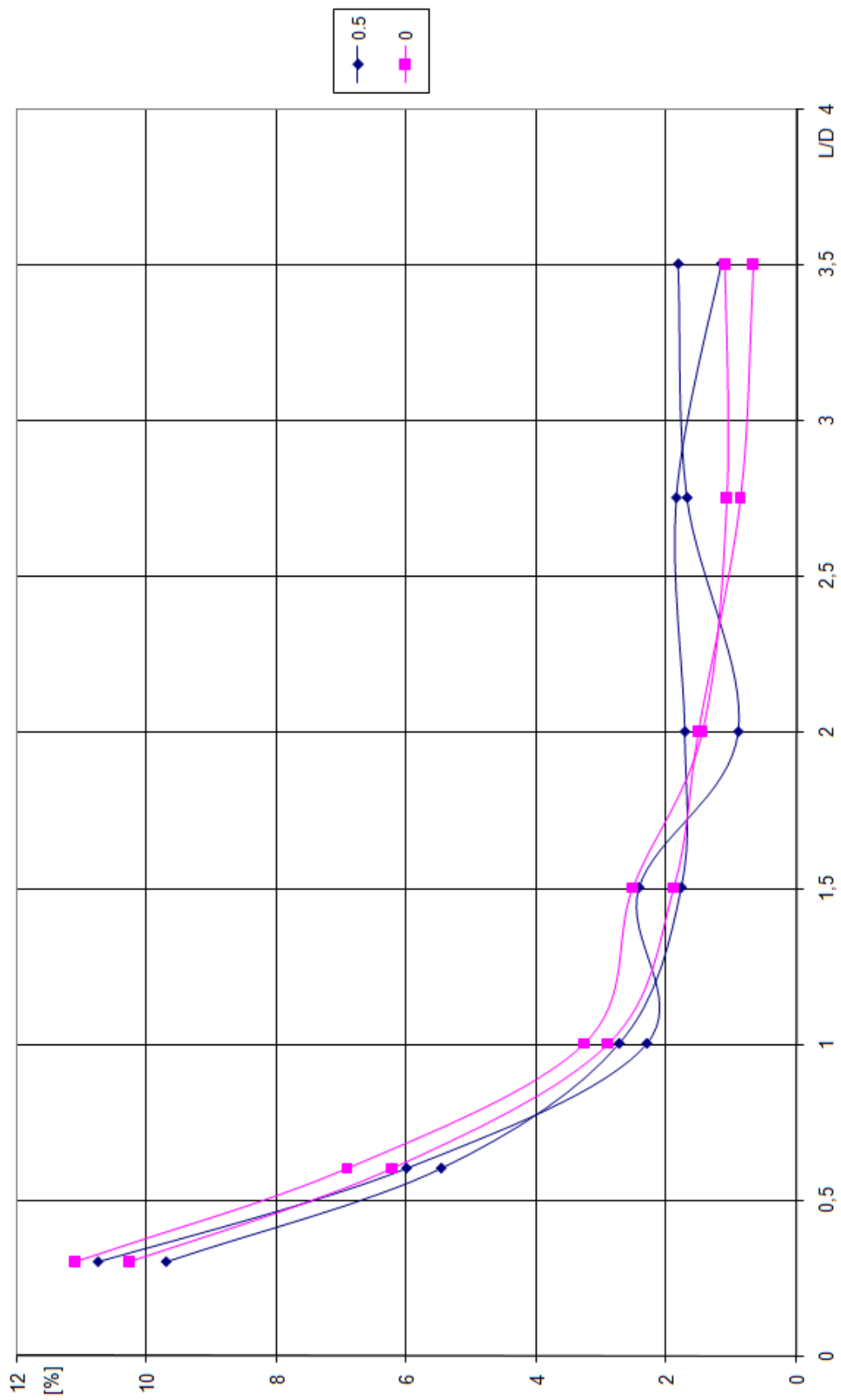
Příloha B: Graf odchylek průtoků při 8 l/s, v legendě jsou sklony žlabu



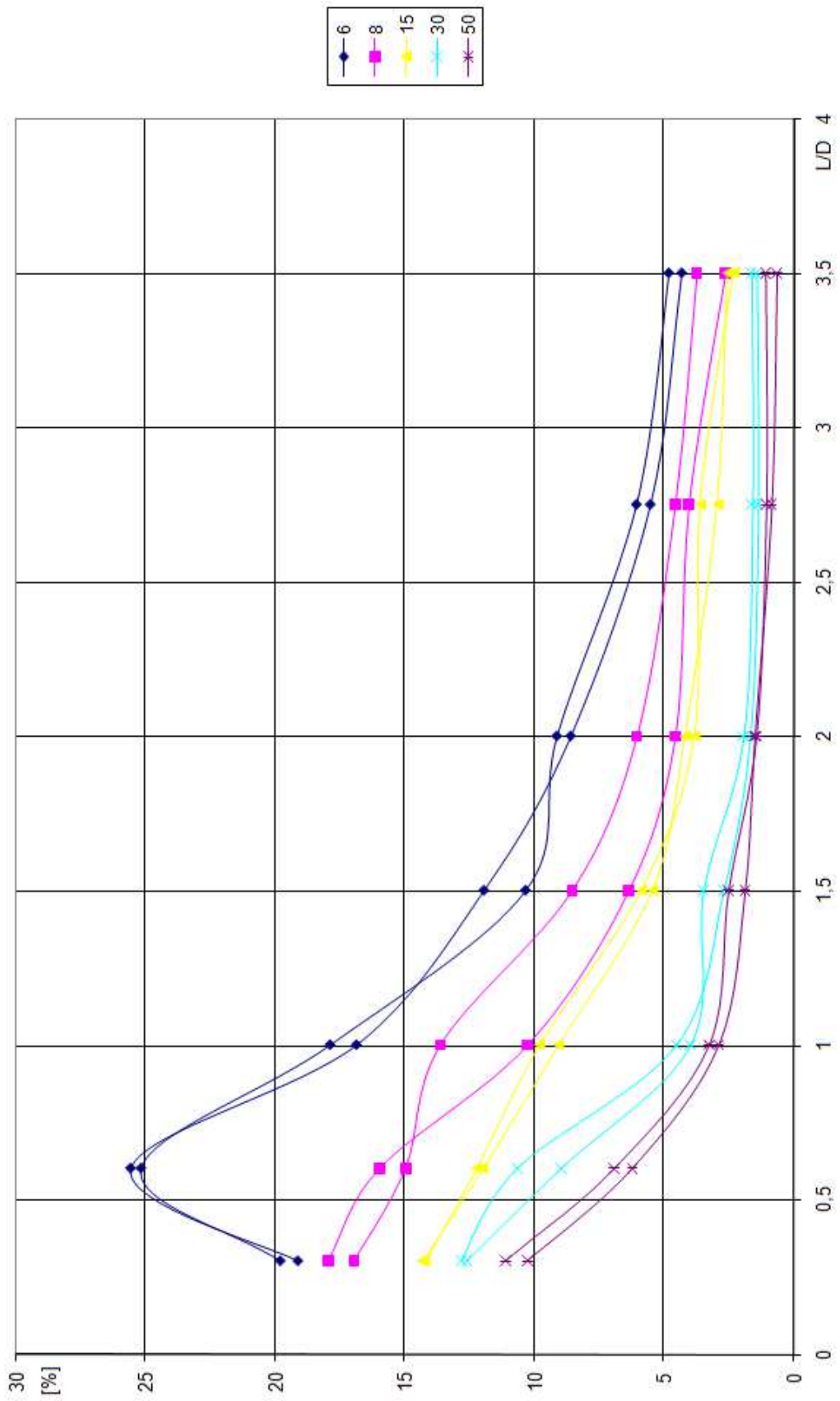
Příloha C: Graf odchylek průtoků při 15 l/s, v legendě jsou sklony žlabu



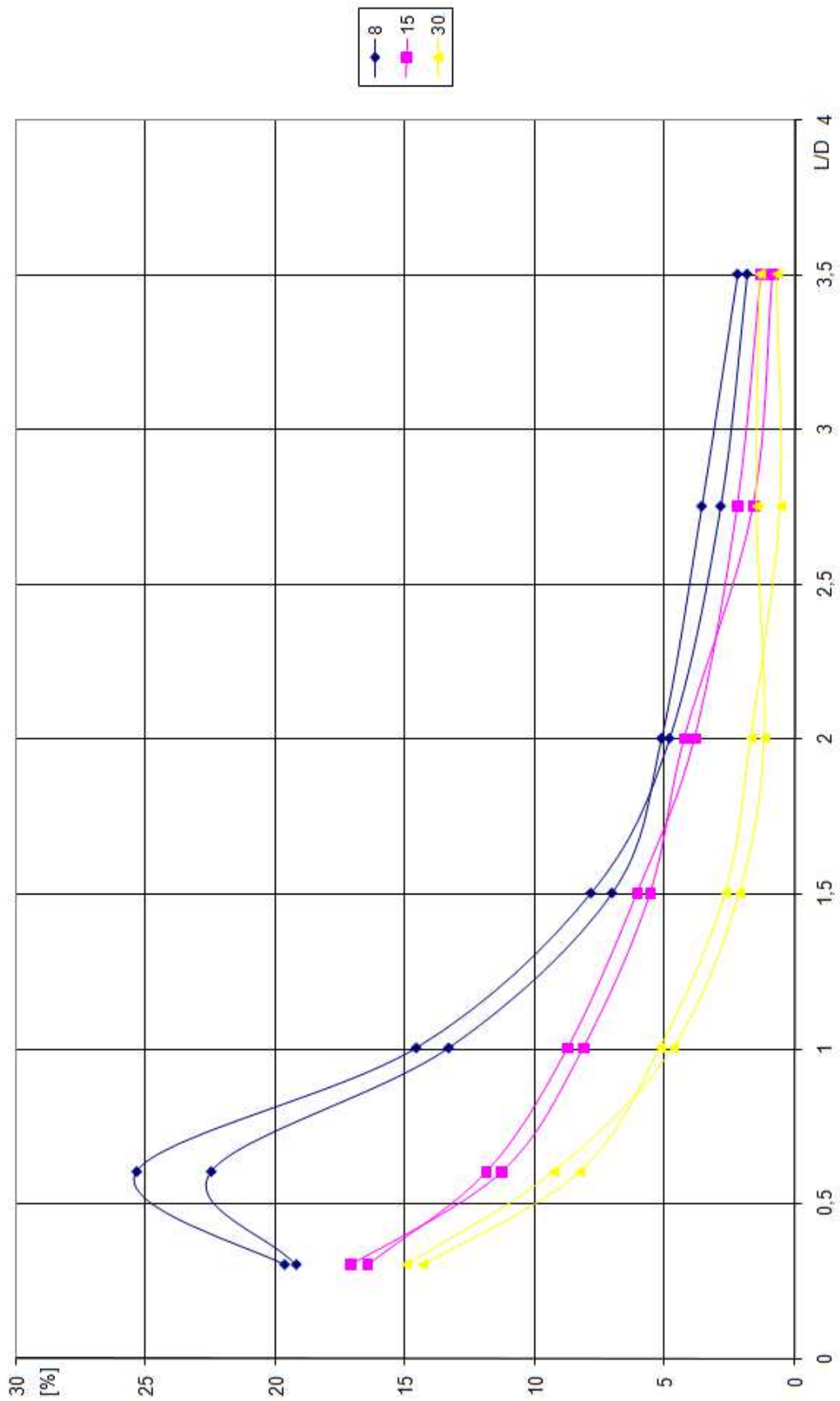
Příloha D: Graf odchylek průtoků při 30 l/s, v legendě jsou sklony žlabu



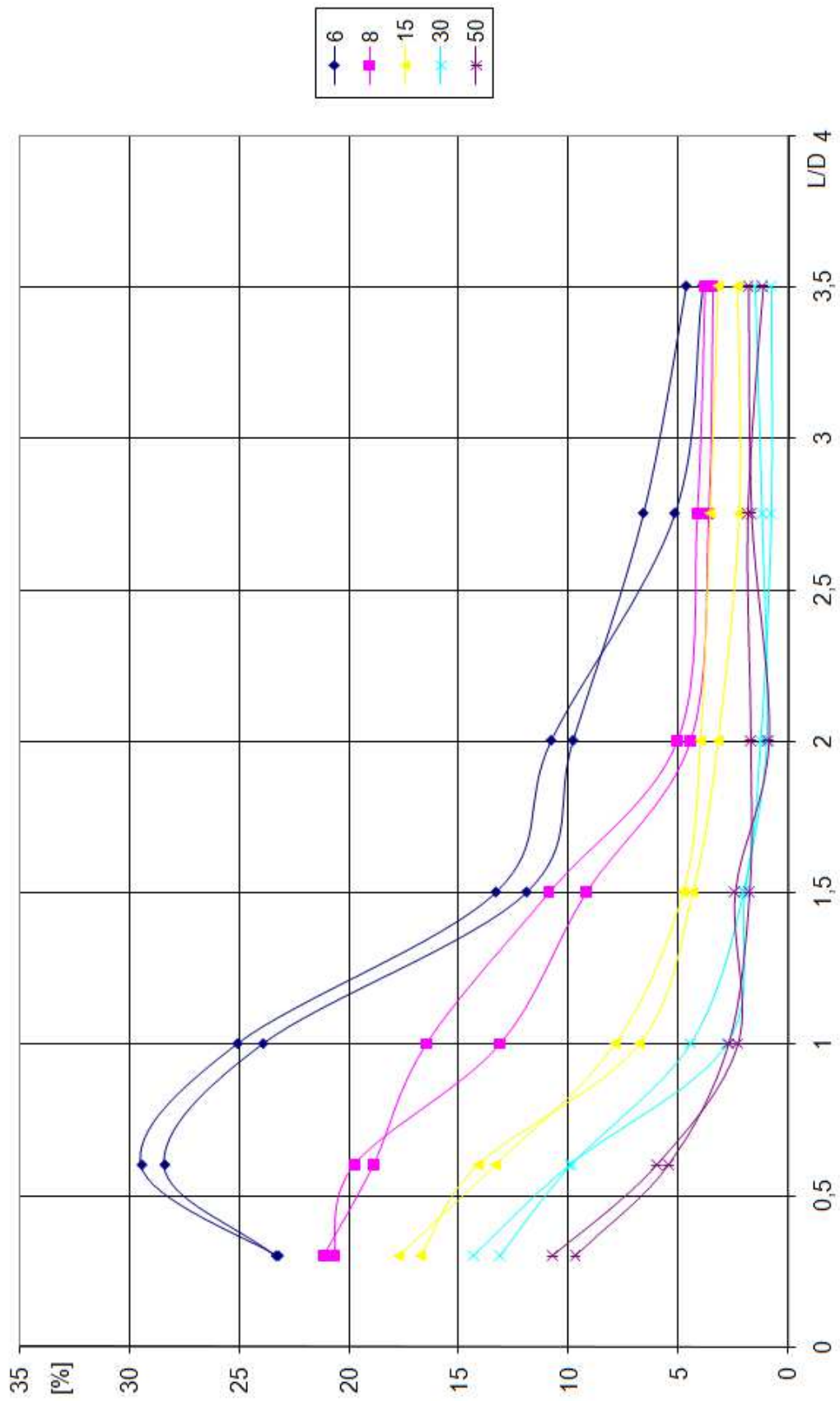
Příloha E: Graf odchylek průtoků při 50 l/s, v legendě jsou sklony žlabu



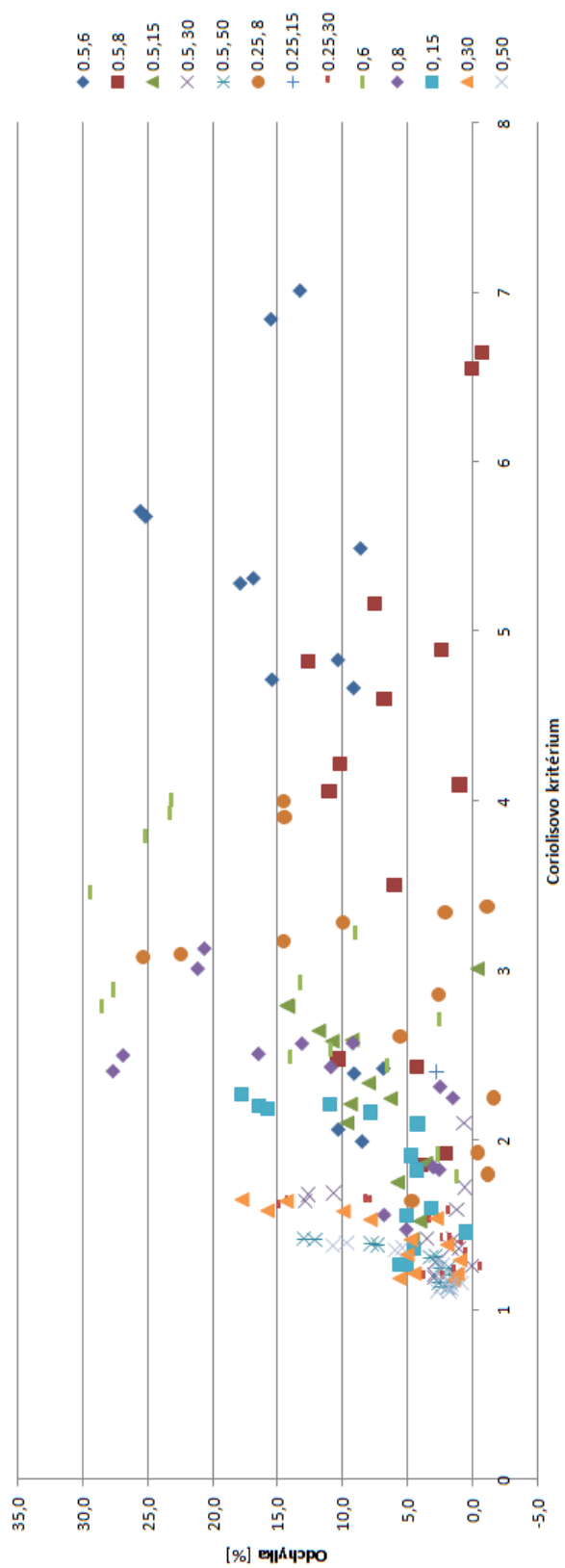
Příloha F: Graf odchylek při sklonu žlabu 0.00%, v legendě jsou hodnoty průtoků



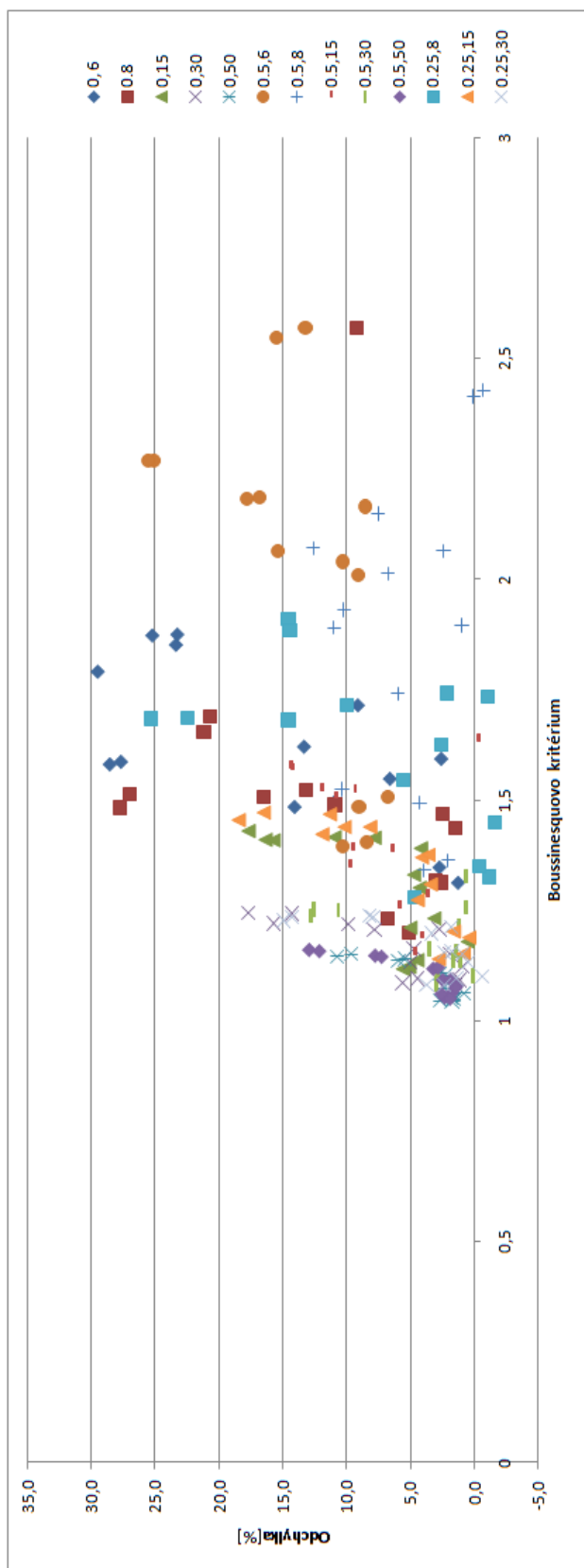
Příloha G: Graf odchylek při sklonu žlabu 0.25%, v legendě jsou hodnoty průtoků



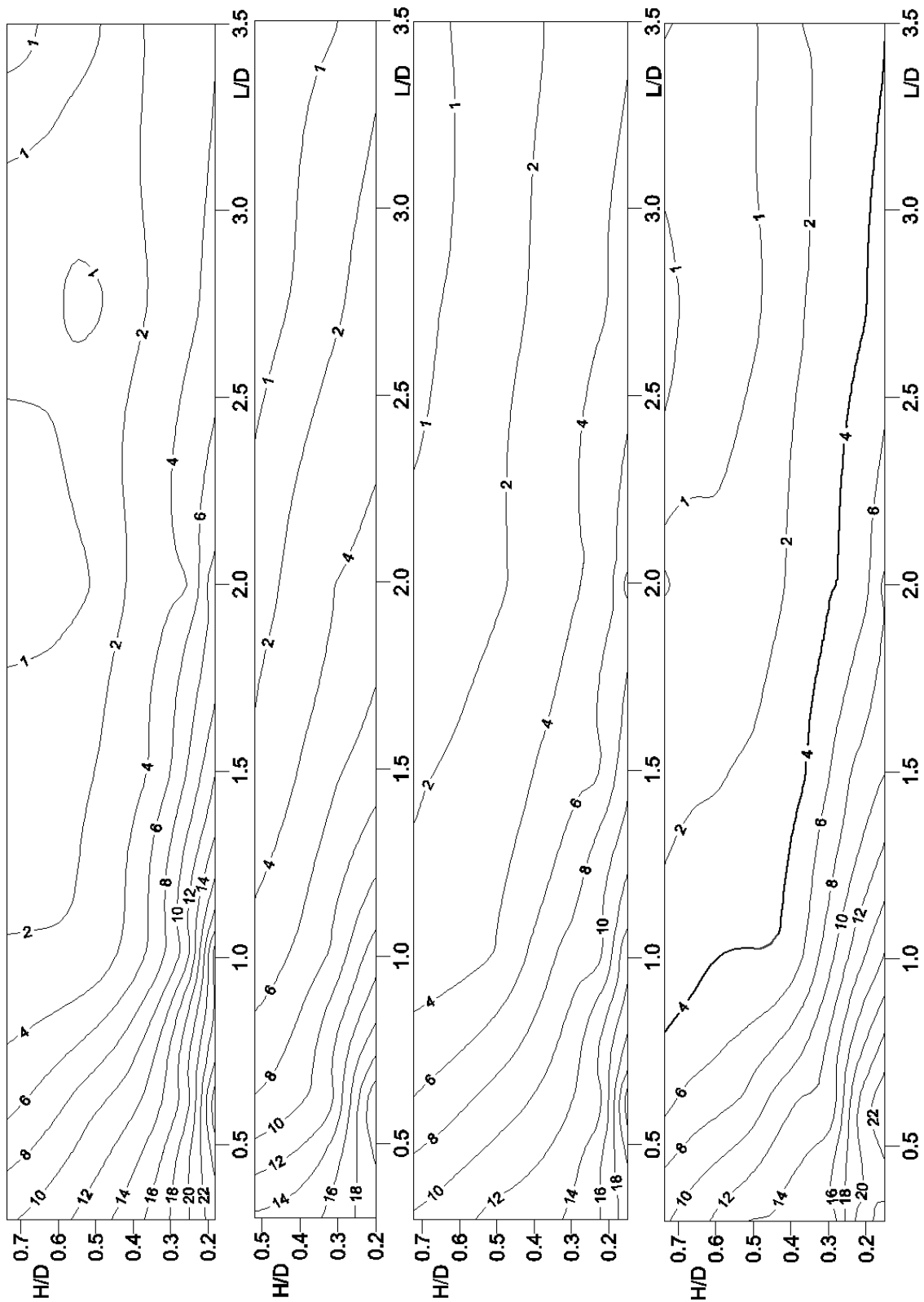
Příloha H: Graf odchylek při sklonu žlabu 0.50%, v legendě jsou hodnoty průtoků



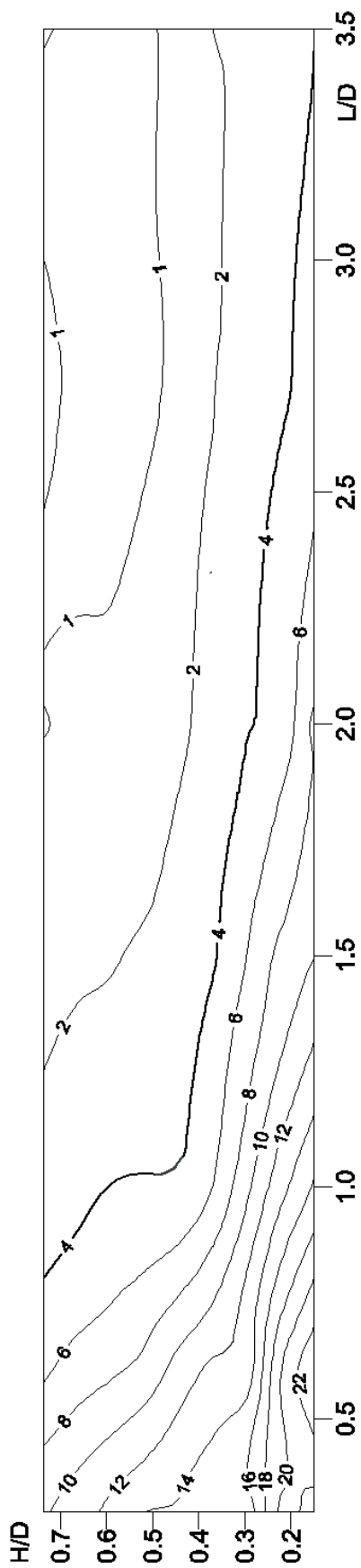
Příloha I: Graf závislosti odchyly hydrometrování od skutečného průtoku na Coriolisovo kritériu, legenda je ve tvaru: sklon[%], průtok [l/s]



Příloha J: Graf závislosti odchylky hydrometrování od skutečného průtoku na Boussinesquovu kritériu, legenda je ve tvaru: sklon[%], průtok [l/s]



Příloha K: Grafy závislosti odchylky hydrometrování [%] od skutečnosti na relativní hloubce a relativní vzdálenosti od vyústění trubky. Sklon žlabu zleva 0.00%, 0.25%, 0.50% a všechna měření dohromady.



Příloha L: Graf závislosti odchylky hydrometrování [%] od skutečnosti na relativní hloubce a relativní vzdálenosti od vyústění trubky. Všechna měření.



ČESKÁ KALIBRAČNÍ STANICE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ
Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
Praha 6, Podbabská 30, PSČ 160 62



1. list z 1 listu

Kalibrační list byl vydán ČKSVV, akreditovanou ke kalibraci vodoměrných vrtulí a měřidel. Osvědčení o akreditaci kalibrační laboratoře číslo 2278 vydal Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Kalibrační list číslo 09075

Kalibrováno podle normy ČSN ISO 3455

Výrobce vrtule:	OTT-C-2	Datum kalibrace:	18.11.2009
Číslo těla:	198054	Způsob uchycení:	Na tyči
Číslo propelleru:	5-01	Teplota vody:	11 °C
Majitel vrtule:	Vysoké učení technické v Brně	Nejistota měření:	± 0,8 %
	Veveří 331/95	Úroveň spolehlivosti:	95 %
	602 00 Brno		

POZNÁMKY:

VÝSLEDEK KALIBRACE:

$$v = a + bn$$

kde: v.....rychlost v metrech za sekundu

n.....počet otáček propelleru za sekundu

a,b.....konstanty

$$0,42 \leq n \leq 4,99 \quad v = 0,0342 + 0,0587n$$

$$4,99 \leq n \leq 23,21 \quad v = 0,0590 + 0,0537n$$

PROHLÁŠENÍ:

1. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02.
2. Měřidla použitá při kalibraci jsou metrologicky navázána na pracovní etalon ev. č. 9694/1/1, kalibrační list č. 21735/2004. Měřidlo má metrologickou návaznost na národní etalon.
3. Kalibrační laboratoř prohlašuje, že výsledky kalibrace se týkají pouze předmětu kalibrace.

V Praze dne 19. 11. 2009

Jméno odpovědného pracovníka:

Ing. Libuše Ramešová
vedoucí ČKSVV

Podpis:



Kalibrační list nesmí být bez písemného schválení ČKSVV Praha rozmnožován jinak než celý.
Nedílnou součástí kalibračního listu je příloha dle ČSN ISO 3455

Příloha M: Kalibrační list použité vrtule