

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: B4106 Zemědělská specializace

Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody měření průtoku vody v povrchových tocích – nejistoty měření.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Žlábek, Ph.D.

Autor: Ondřej Šebor

České Budějovice, duben 2012

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Fakulta zemědělská

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ondřej ŠEBOR
Osobní číslo: Z09533
Studijní program: B4106 Zemědělská specializace
Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí
Název tématu: Metody měření průtoku vody v povrchových tocích - nejistoty měření.
Zadávací katedra: Katedra krajinného managementu

Zásady pro vypracování:

Ílem práce je vyhodnocení přesnosti ultrazvukového měření průtoků na měrných přepadech osazených na uzávěrových profilech jednotlivých výzkumných povodí. Účelem práce je zpřesnění datových vstupů jak pro modelování srážko-odtokových procesů především v oblasti kalibrace a validace jednotlivých nastavení modelů, tak i pro ostatní hydrologické analýzy a studie prováděné v rámci výzkumných projektů. Při kontinuálním měření průtoků na měrných přepadech dochází při použití univerzálních rovnic často k chybným výsledkům vzhledem k rozdílným podmínkám nad přepadem. Vhodnost použití těchto univerzálních rovnic je třeba v terénu ověřovat jinými způsoby měření průtoků. Výsledkem práce bude verifikace výpočtových vztahů, použitých při kontinuálním monitoringu měrného přepadu, příp. navržení nových konzumpčních křivek pro jednotlivé přepady dle výsledků měření získaných různými způsoby měření. Součástí práce bude literární rešerše týkající se řešené problematiky.

1. Literární rešerše na daná témata:

- a. odtok a průtok
- b. metody měření průtoku
- c. nejistoty měření

2. Popis a zpracování konkrétního povodí, měrných přepadů a souvisejících dat.

3. Bodové měření v terénu, srovnání s kontinuálním monitoringem.

4. Vyhodnocení a závěr.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 35 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

Boiten, W. Hydrometry. IHE Delft Iemure note series, Rotterdam, 2000.
Brutsaert, W. Hydrology: An introduction. Cambridge University Press, 2005, 605 s.
Kříž, V. et al.: Hydrometrie. Praha, SPN, 1989.
Maidment, DR. Handbook of hydrology, McGraw-Hill, New York, 1994.
Články v recenzovaných časopisech (dop. Journal of Hydrology, Hydrological processes, Water Resources Research a další)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Žlábek, Ph.D.
Katedra krajinného managementu

Datum zadání bakalářské práce: 14. března 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. dubna 2012


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studejská 13
370 05 České Budějovice


prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 14. března 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

Datum.....

Podpis studenta.....

Poděkování

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Žlábkovi, Ph.D. při tvorbě této práce. Děkuji za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům katedry krajinného managementu, při zpracování praktické části bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce je rozdělena na literární rešerši a na praktickou část. Obsahem literární rešerše je problematika odtoku a průtoku, metody měření průtoku, a nejistoty měření. V praktické části bakalářské práce je popsáno zpracování konkrétního měření průtoků na toku (Kopaninský potok). Je zde seznámení s bodovými měřeními průtoků v terénu a srovnání měření průtoku objemovou metodou s kontinuálním měřením. Účelem práce je zpřesnění vstupů pro modelování srážko-odtokových procesů, především v oblasti kalibrace a validace jednotlivých nastavení modelů, tak i pro ostatní hydrologické analýzy a studie prováděné v rámci výzkumných projektů. Často vlivem rozdílných podmínek nad přepadem dochází k mylným výsledkům, proto je třeba dbát na vhodnou aplikaci univerzálních rovnic, které se ověřují v terénu i jinými způsoby měření průtoku.

Výsledkem práce je rešerše jako kvalitní informační podklad pro případné pokračování v rámci diplomové práce, dále pak prvotní ověření výsledkových vztahů použitých při kontinuálním monitoringu měrného přepadu a stanovení nové rovnice konzumpční křivky.

Klíčová slova: měření průtoků, bodové měření rychlostí vody, kontinuální měření, měrný přepad, objemové měření průtoku, odtok.

Abstract

The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part includes issues associated with runoff and discharge, methods for discharge measurement and measurements of uncertainties. In the practical part of the thesis a specific process flow measurement in Kopaninský stream is describes. The water flow velocity measurement is described and comparison of methods volume measurement discharge with continuous measurement is carried out. The purpose of this work is to gain more accurate data inputs for modeling of rainfall-runoff processes, especially in the calibration and validation stage, as well as for hydrological analysis and other studies conducted in research projects. Often due to different conditions upstream the weirs incorrect results may occur during measurements, so it is important to ensure verification of universal equations in the field with other methods of discharge measurement for further appropriate application.

The result of this work is literature overview concerning runoff measurements techniques and measurements uncertainties serving as a basis for the continuation of the thesis. Further the results of practical part are used for primary verifications of continuous discharge monitoring and determination of a new equation of consumption curve.

Key Words: discharge measurement, water flow velocity measurement, continuous measurement, measuring weir, volume measurement method, runoff.

Obsah

1. Úvod	9
2. Literární přehled	10
2.1 Povrchový odtok	10
2.2 Hydrometrování	11
2.3 Průtok.....	11
2.4 Druhy měření průtoku	12
2.4.1 Měření průtoků do nádoby	12
2.4.2 Měření průtoků pomocí přelivů a měrných žlabů	13
2.4.3 Bodové měření rychlostí proudění vody.....	17
2.4.4 Měření průtoků pomocí indikátorových metod	22
2.5 Přesnost měření průtoků.....	24
3. Materiál a metody	26
3.1 Materiál	26
3.2 Metody	29
3.2.1 Měření průtoku pomocí hydrometrické vrtule	29
3.2.2 Měření průtoku pomocí ultrazvukového měřiče	31
3.2.3 Objemové měření průtoků.....	33
3.2.4 Popis vlastního měření.....	34
4. Výsledky	39
5. Závěr.....	42
6. Literatura:.....	43

1. Úvod

Řešení odtoku z malých lesnických a zemědělských povodí a jeho měření je problém, kterým se zabývá současná hydrologie. Právě zpřesňování měření průtoků, zvláště pak měření popř. simulace povodňových vln jsou faktory, které nám pomohou poskytnout informace o chování daného povodí.

Hydrometrie je oddíl hydrologie, zabývající se měřením hydrologických prvků, způsoby měření a přístroji k tomu potřebnými, jakož i metodami získávání, zpracování a archivace dat (KŘÍŽ A KOL., 1988).

K hlavním úkolům hydrometrie náleží rozpracování metod měření a pozorování a rozpracování přístrojů a zařízení umožňující kvantitativní hodnocení průběhu hydrologických jevů (hydrometrie odpovídá na otázku jak a čím měřit), systematické sledování (měření, pozorování těchto jevů a zpracování a zveřejňování výsledků měření a pozorování (PASLAWSKI IN KŘÍŽ A KOL., 1979).

Průtok je obvykle sledován v otevřených, nebo uzavřených kanálech či potrubí. Podle strukturální podmínky se často setkáváme s obtížnými podmínkami pro měření průtoků (RIYAZ, STEFFEN, 2002).

Cíl práce

Práce si klade za cíl zpracovat rešerši jako kvalitní informační podklad pro pokračování v rámci diplomové práce. Dále pak provést kontrolní měření průtoků na toku Kopaninský potok, který je osazen zařízením pro kontinuální měření průtoků a na něm provést kontrolní měření jinými metodami. Následně vyhodnocení výsledků měření a jejich porovnání s výsledky měření telemetrické stanice, ze kterých se poté sestrojí nová rovnice konzumpční křivky.

2. Literární přehled

2.1 Povrchový odtok

Povrchový odtok je proces, který se skládá z hydrologických a hydraulických procesů. Hydrologickými procesy rozumíme vyplňování prohlubní v povrchovém odtoku, vsakování, výpar apod. Hydraulickými procesy rozumíme procesy, které popisují pohyb vody po povrchu od dopadu až po zaústění od vtoku do kanalizace (HALOUN, 1993).

Fáze povrchového odtoku

V procesu povrchového odtoku se rozlišují 3 fáze:

1. Fáze bezodtoková

Intenzita deště je menší než intenzita infiltrace, průměrná výška deště na povodí je menší než retenční schopnost povodí. Pod pojmem retenční schopnost povodí rozumíme dočasné zadržetí vody na vegetaci a objektech (předmětech) v povodí, zadržetí vody v pokryvné vrstvě povrchu půdy (posklizňové zbytky, lesní hrabanka apod.), v půdě, v mikrodepresích, poldrech a nádržích (SOUKUP, HRÁDEK, 1990).

2. Fáze plošného (svahového) odtoku

Nastává po fázi bezodtokové. Intenzita deště je větší než intenzita infiltrace, průměrná výška deště na povodí je větší než retenční schopnost povodí nebo je retenční kapacita již naplněna. V procesu odtoku se uplatňuje především povrchový a hypotermický odtok (SOUKUP, HRÁDEK, 1990).

3. Fáze soustředěného odtoku nastává při postupném soustředování odtoku do hydrografické sítě v povodí, v recipientu (v údolnici) se uplatňují všechny složky celkového odtoku (SOUKUP, HRÁDEK, 1990).

Činitelé ovlivňující odtok

Množství vody odtékající z povodí určitým profilem toku je výslednicí řady činitelů, z nichž rozhodující v našich podmínkách jsou atmosférické srážky, které svým množstvím a časovým rozdělením předurčují časový průběh odtoku (KREŠL, 2001).

Vztah mezi srážkami a odtokem není však přímý. Je modifikována jednak aktivně ostatními klimatickými faktory, jejich dynamikou vývoje, jednak pasivně ostatními fyzicko geografickými činiteli, kteří jsou v daném povodí stálé. Mimoto se projevuje i vliv člověka (BEZDÍČEK, 1966).

2.2 Hydrometrování

Výsledků hydrometrování v měrných profilech v říční síti se využívá k praktickým i vědeckým účelům. S ohledem na praktické využití lze např. uvést úzký vztah hydrometrie a řízení provozů vodních děl. Z vědeckého hlediska hydrometrie přispívá k dalšímu rozvoji hydrologie, včetně jejích teoretických základů (KŘÍŽ A KOL., 1988).

2.3 Průtok

Průtok, průtočné množství

- (1) Protékání vody průtočným profilem
- (2) Objem vody protékající průtočným profilem za jednotku času
- (3) Objem nebo hmotnost specifikované substance proteklé průtočným profilem za jednotku času, např. průtok dnových splavenin

Pozn. Synonymnímu termínu **průtočné množství** odpovídá definice (2)

(ČSN 75 0101, 2003).

Základní jednotkou pro odtok v korytě vodního toku je průtok – Q , jímž rozumíme množství vody, které protéká za jednu vteřinu příčný průřezem toku. Vyjadřuje se v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Průtok vody Q vztažený na jednotku plochy povodí S_p k zájmovému profilu nazýváme měrným (specifickým) odtokem q :

$$q = \frac{Q}{S_p} \quad (\text{l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}, \text{ popř. } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$$

(KUNSTÁTSKÝ, PATOČKA, 1966).

2.4 Druhy měření průtoku

Dub et. al. (1969) ve své knize rozdělil měření průtoků na:

- měření průtoků do nádoby,
- měření průtoků pomocí přelivů, měrných žlabů a průtokoměrů,
- měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule,
- měření průtoků pomocí indikátorových metod.

2.4.1 Měření průtoků do nádoby

Objemové měření se dělí na spojitě a nespojitě. Objemová měřidla se spojitým měřením přecházejí ihned po naplnění jednoho objemu na plnění dalšího objemu, čímž je umožněno průběžné měření průtoků. Tato měřidla můžeme dále dělit na měřidla s otevřenými měrnými prvky (objemová měřidla kyvná a bubnová) a s uzavřenými měrnými prvky (objemová měřidla lamelová, segmentová, pístová, prstencová, s elptickými koly a s komorovým bubnem). Nespojitá objemová měření jsou jednoduchá, protože se měří doba, za kterou nateče předem známý objem (PELIKÁN A KOL., 1988).

Průtočné množství se stanoví v nejjednodušším případě zachycováním přitékající vody do nádob známého obsahu. Průtočné množství Q se pak vypočte z jednoduchého vztahu.

Pokud měříme pomocí odběru vody přímo do nádoby, pak průtok spočítáme:

$$Q = V/t$$

kde V - objem zachycené vody,

t - čas, po který jsme vodu odebírali.

Pro eliminaci případné hrubé chyby provedeme odběr vody 3x a výsledný průtok spočítáme jako aritmetický průměr všech naměřených průtoků. Tento velmi přesný způsob je použitelný pouze při malých průtocích (asi $6 - 8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při obsahu nádoby do 20 l) (ŽOUŽELA, ŠULC, 2001).

Množství kapaliny můžeme měřit objemově nebo hmotnostně. V hydrogeologii se nejčastěji měří doba, za kterou nateče určitý objem vody. Stanovení hmotnosti protékající kapaliny se využívá především v metrologii při etalonážích měření (PREISLER A KOL., 1967).

2.4.2 Měření průtoků pomocí přelivů a měrných žlabů

U měrných žlabů se dosahuje zmenšením profilu (zúžením žlabu, zvýšením úrovně dna nebo obojím současně), že voda zúženým místem protéká při kritické nebo nadkritické rychlosti, která v tomto místě způsobí snížení hladiny. Z měření tohoto snížení a úrovně hladiny před hrdlem stanovíme velikost průtoku. Někdy pro stanovení průtoku postačuje změření hladiny jen v jednom z uvedených míst (PELIKÁN A KOL., 1988).

Podle konstrukce předivné hrany rozlišujeme tyto základní typy ostrohranných přelivů:

- obdélníkový přeliv bez postranní kontrakce (Bazinův),
- obdélníkový přeliv s boční kontrakcí (Ponceletův),
- trojúhelníkový přeliv s vrcholovým úhlem výřezu 90° (Thomsonův), 45° , $22 \frac{1}{2}^\circ$,
- lichoběžníkový přeliv (Cippolettiho).

Kombinací mohou vzniknout složené přelivy (dva obdélníkové, trojúhelníkový s obdélníkovým). V literatuře se ještě udávají speciální typy přelivů:

- kruhový přeliv,
- parabolický přeliv aj.,

kteřé se však při praktickém měření užívají jen výjimečně. Při hydrologických měřeních se nejčastěji setkáváme s trojúhelníkovým a obdélníkovým výřezem měrných přelivů. Přelivy se budují stabilní nebo přenosné (PELIKÁN A KOL., 1988).

Thomsonův přeliv (přepad)

Ostrohranný trojúhelníkový přeliv se používá především na lokalitách s velkým rozsahem průtoků. S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste kvadraticky průtočná plocha, což se projevuje ve vzorci konzumpční křivky tvarem:

$$Q = a \cdot h \cdot 2,5$$

Přeliv je zvýšeně citlivý na změnu hloubky. Chyba hloubky se projevuje při výpočtu průtoku s mocninou $n= 2,5$. Pro tyto přelivy je nezbytné používat pouze přesnější elektronické vyhodnocovače. Při správném vyhodnocování přepadové výšky a přesném stanovení konzumpční křivky se přeliv řadí mezi nejpřesnější průtokoměry (PARS AQUA, 2009).

Obr. 1 - Thomsonův přeliv



Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

Thomsonův přepad je ve tvaru rovnoramenného pravoúhlého trojúhelníku. Průtok se stanoví ze vzorce:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{5}{2}} = 2,362 \mu \cdot h^{\frac{5}{2}}$$

Kde Q - průtok

μ - koeficient přepadu (obvykle $\mu = 0,62$)

h - výška vodního paprsku (přepadová výška)

g - gravitační zrychlení

(KŘÍŽ A KOL., 1979).

Dále viz metodika.

Ponceletův přeliv

Ostrohranný obdélníkový přeliv se používá především na lokalitách s vyrovnaným rozsahem průtoků. S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste lineárně průtočná plocha, což se projevuje ve vzorci konzumpční křivky tvarem:

$$Q = a \cdot h^{1,5}$$

Přeliv je přiměřeně citlivý na změnu hloubky. Chyba měřené hloubky se projevuje při výpočtu průtoku s mocninou $n = 1,5$ a proto je možno pro tento typ přelivu používat i méně přesné a tedy levnější průtokoměry. Při správném vyhodnocování přepadové výšky a přesném nastavení konzumpční křivky se přeliv řadí mezi velmi přesné průtokoměry (PARS AQUA, 2009).

Obr. 2 - Ponceletův přeliv



Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

Princip měřidla spočívá v umístění svislé ostrohranné příčné stěny do stávajícího pravouhlého kanálu tak, aby voda mohla za extrémních poměrů současně příčnou stěnu podtékat a přepadat. Měřidlo pracuje ve dvou pracovních režimech. Při prvním režimu voda pouze vytéká pod příčnou stěnou. V režimu druhém voda stěnu podtéká a přepadá. To umožní převedení maximálních průtoků (srážka, technologická špička). Přeliv je opatřen bočním zúžením (typ - Poncelet) pro dokonalé zavzdušnění spodního líce přepadového paprsku. Princip stanovení průtoku spočívá v měření vzduté hloubky před příčnou stěnou, k níž je kalibrační stanoven příslušný průtok (metoda Q/H charakteristiky) (ŽOUŽELA, 1999).

Hydraulicky lze problematiku navrženého měřidla (příčné stěny) chápat jako výtok pod stavidlem a výtok pod a přes stavidlo. Nejjednodušší vztah vystihující závislost odtokového množství Q_0 pod stavidlem na vzduté hloubce H před ním.

$$Q_0 = \mu B a \sqrt{2gH}$$

Kde a je velikost otevření pod stavidlem,
 B - je šířka přítokového koryta,
 g - tíhové zrychlení a
 μ - je součinitel výtoků zahrnující ztráty na výtoku, hodnotu kontrakčního součinitele, Coriolisovo číslo a hodnotu rychlostní výšky.

Hodnota výtokového součinitele je udávána často v závislosti na poměru H/a . Vztah je odvozen a platí pro neovlivněný výtok pod svislým ostrohranným stavidlem (SCHRÖDER ET AL., 1994).

Měrné žlaby

Užívají se v hydrometrické praxi, při měření průtoků zúženým profilem. Zmenšením bočních stěn nebo i zvýšením dna průtokového žlabu se dosáhne snížení hladiny, případně až na kritickou hloubku (KŘÍŽ A KOL., 1979).

Parshallův žlab

(Rozšířená nejistota měření +/- 4%) (PARS AQUA, 2009).

Z různých typů měřících žlabů se nejčastěji používá Parshallův žlab, který je modifikací Venturiho koncepce pro měření průtoku v podobě otevřeného pravoúhlého kanálu. Žlab se skládá ze tří částí – sbíhavé, hrdlové a rozšiřující. Zatímco dno sbíhající části je vodorovné, v hrdlové části klesá. U Parshallova žlabu je koruna definována jako linie spojující sbíhavou a hrdlovou část. Poloha hladiny se měří ve sbíhavé části ve stanovené vzdálenosti před korunou a na konci hrdlové části. K měření polohy hladiny se často používají ultrazvukové snímače. Parshallův žlab je vhodný k měření průtoku až do $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{den}$. Podle obecného pravidla by měla být šířka hrdla $1/3$ až $1/2$ šířky koryta kanálu. Podle měřicího rozsahu má hrdlo šířku od 25 mm do 12 m (KADLEC, 2006).

Venturiho žlab

(Rozšířená nejistota měření +/- 7 %)

Řadí se mezi žlaby bez hrdla. Jeho použití je nepatrně omezeno větší hodnotou minimálního průtoku (při stejné šířce hrdla v porovnání s Parshallovým žlabem) a zároveň větší hodnotou nejistoty měření. Měrný žlab se řadí mezi žlaby bez hrdla, a tedy chování proudnic není tak stabilní jako u žlabu s hrdlem. Měření hloubky na přelivu se dle typových podkladů umísťuje do značné vzdálenosti před žlab, avšak dle zkušeností vyhovuje snímání hloubky již ve vzdálenosti 3h (trojnásobek přepadové hloubky) (PARS AQUA, 2009).

2.4.3 Bodové měření rychlostí proudění vody

Rozdělení rychlostí v průtočném průřezu

Plochu průtočného průřezu měříme běžnými geodetickými způsoby. Střední průřezovou rychlost stanovíme z měřených hodnot bodových rychlostí Pitotovou

trubicí, hydrometrickou vrtulí nebo z povrchových rychlostí měřených plováky, popř. výpočtem podle empirických vzorců.

Rozdělení rychlostí v průtočném průřezu je nerovnoměrné. Maximální rychlost je pod hladinou v hloubce asi 0,75 – 0,8 h (od dna), od níž směrem k hladině (vlivem tření o vzduch) i ke dnu ubývá. Rozdělení rychlostí ve svislici lze v prvním přiblížení vyjádřit parabolou s vrcholem v místě maximální rychlosti (BEZDÍČEK, 1966).

Rychlost proudění v měrném bodě se určí podle dané rovnice. Rozložení měrných bodů má vystihnout rozložení rychlostí proudění ve svislici. Vzhledem k nestejnomyému rozložení rychlostí proudění ve svislici, při nepravidelně rozložených bodech (podél subjektivní volby), doporučuje se umístit většinu bodů do dolní poloviny svislice. Velmi běžně se však používá pravidelného rozmístění bodů v měrných svislicích, neboť usnadňuje určení průměrných rychlostí ve svislicích a dostatečnou spolehlivost (bez grafického znázornění průběhu rychlostí v závislosti na hloubce) (LEER, 1924).

Při bodovém měření rychlostí proudění je třeba dodržovat některé všeobecné zásady. Hydrometrická vrtule nesmí při měření vyčnívat nad hladinu (při všech polohách rozvlněné hladiny) nebo otočnou část zachytávat o dno. Při měření u dna nemá být vrtule umístěna za většími výčnělky dna a umístění měrného bodu při dně nemá být výše než je 1,5 násobek průměru vrtule. Poloha bodu při pravidelném rozmístění bodů v měrné svislici se zaokrouhlují na centimetry (LEER, 1924).

Stanovení průtoků z měřených rychlostí

Nejčastěji se zjišťuje průtočné množství stanovením plochy průtočného průřezu S a střední průřezové rychlosti v , výpočtem z rovnice:

$$Q = S \cdot v \quad (m^3 \cdot s^{-1})$$

Plochu průtočného průřezu měříme běžnými geodetickými způsoby. Střední průřezovou rychlost stanovíme z měřených hodnot bodových rychlostí Pitotovou trubicí, hydrometrickou vrtulí nebo z povrchových rychlostí měřených plováky, popř. výpočtem podle empirických vzorců (KREŠL, 2001).

2.4.3.1 Hydrometrické vrtule

Základním přístrojem pro zjišťování průtoku na vodních tocích měřením rychlosti proudění vody a stanovením průtočné plochy je hydrometrická vrtule. Hydrometrická vrtule je zařízení na měření rychlosti proudění vody. Rychlost proudění se určuje pomocí počtu otáček pohyblivé části přístroje (vrtule, rotoru) za určitý časový interval (KŘÍŽ A KOL., 1988).

K základním částem hydrometrické vrtule náleží, pohyblivá část (vrtule, osa) tělo vrtule s kontaktním zařízením, případně i přídavným závažím, signální zařízení, směrový stabilizátor (kormidlo). Nezbytnou součástí každé hydrometrické vrtule je soutyčí (s délkovou stupnicí pro měření hloubek) nebo závěs s manipulačním zařízením (KŘÍŽ A KOL., 1979).

Základní parametry hydrometrické vrtule

Při měření rychlosti proudění vody hydrometrickou vrtulí se využívá závislosti mezi počtem otáček vrtule (rotoru) a rychlostí proudění vody. Počet otáček je úměrný rychlosti tekoucí vody:

$$v = f(n)$$

Kde v - je rychlost proudění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

n - počet otáček za sekundu.

(PATOČKA, 1977).

Klasifikace hydrometrických vrtulí

Vyráběné hydrometrické vrtule můžeme rozdělit do určitých skupin (typů) podle různých hledisek nebo charakteristických konstrukčních znaků.

1. podle způsobu použití

- na tyči,
- na závěsu,
- universální,
- speciální.

Toto rozdělení je z hlediska měření průtoků nejobecnější a vytváří tak v rámci aspektu základní typy.

2. podle polohy osy otáčení pohyblivé části

- s horizontální osou otáčení (např. Metra, Ott),
- s vertikální osou otáčení (např. Preiss).

3. podle konstrukce vlastní vrtule

- se šroubovitou vrtulí (např. Metra, Ott, Rost),
- s miskovitou vrtulí (např. Preiss).

4. podle konstrukce kontaktního zařízení na měření počtu otáček vrtule

- s mechanickým počítacem otáček (např. VM-M),
- s elektrickou signalizací počtu otáček (většina vyráběných hydrometrických vrtulí).

5. podle velikosti, resp. hmotnosti (toto rozdělení má spíše subjektivní charakter)

- malé (kapesní),
- střední (do 30 kg),
- těžké (nad 30 kg).

(PATOČKA, 1977).

V posledním období přechází i naše hydrologická služba na používání hydrometrických vrtulí, které umožňují měření rychlostí od $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ a od hloubky 3 cm do největších rychlostí a hloubek, které se vyskytují v podmínkách naší hydrometrické praxe. Tyto přístroje představují škálu od laboratorní vrtule po vrtule s přídatným závažím až 100 kg, používané na závěsu. Jsou vybavené spolehlivým

elektrickým, resp. mechanickým snímačem počtu otáček a jejich registrací na počítadle (SOTORNÍK, 1975).

Hydrometrické vrtule na tyči se používají pro měření rychlosti proudění vody v mělkých tocích s přiměřenou rychlostí, umožňujících bezpečné brodění a pro měření se člunu, vhodných lávek a mostů, kde hloubka a rychlost proudění vody umožňují ovládání soutyčí, případně i plavidla. Hydrometrická vrtule je přišroubovaná na vnější trubici soutyčí, kterou se může pohybovat po vnitřní tyči, na které je vyznačeno obvykle centimetrové dělení, nebo je nasazena na tyč s otvorem v těle vrtule (SOTORNÍK, 1975).

Kalibrace vrtulí i některých dalších typů měřidel v ČR provádí Česká národní kalibrační stanice vodoměrných vrtulí při VÚV T.G.M. v Praze. U hydrometrických vrtulí se doporučuje kalibrace po 100 – 200 hodinách provozu, resp. po dvou letech (MATTAS, 1998).

Dále viz metodika.

2.4.3.2 Ultrazvukové průtokoměry

Průtokoměr založený na Dopplerově jevu lze použít v případě, že proudící médium obsahuje částice odrážející zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny vzduchu. Bez těchto částic nemůže průtokoměr tohoto typu pracovat. Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku (STRNAD, 2004).

Vzhledem k pohybu částic nebo bublin s tekutinou, je frekvence přijatého ultrazvukového vlnění odlišná od frekvence vyslané vlny. Rozdíl frekvencí je pak úměrný rychlosti proudění tekutiny (JENČÍK, 1998).

Vzhledem k pohybu částic dochází ke zkreslení frekvencí ΔF . Toto zkreslení je přímo úměrné rychlosti částic. To je dáno:

$$\Delta f = 2f \cdot \frac{\cos \alpha}{C_0} \cdot V_p$$

Kde f - vysílaná frekvence

C_0 - naměřená průměrná rychlost zvuku

V_p - rychlost částic

α - úhel přenosu mezi ultrazvukem a směrem proudění

(RIYAZ, STEFFEN, 2002).

Druhým typem ultrazvukových průtokoměrů jsou přístroje založené na principu měření doby průchodu médiem. Tyto průtokoměry se skládají ze dvou vysílacích/přijímacích jednotek, které jsou umístěné za sebou ve směru proudění. Jeden z vysílačů vysílá ultrazvukový snímač po směru proudění a druhý proti směru proudění. Rozdíl mezi dobou průchodu obou signálů k druhé jednotce je úměrný rychlosti proudění tekutiny. Na rozdíl od průtokoměrů založených na Dopplerově principu, tyto ultrazvukové průtokoměry měří pouze rychlost proudění čistých tekutin. Stejně jako elektromagnetické průtokoměry, tak i ultrazvukové průtokoměry jsou bezkontaktní, proto nezpůsobují tlakovou ztrátu, a také neobsahují pohyblivé části, které by se opotřebovávaly (JENČÍK, 1998). Dále viz metodika.

2.4.4 Měření průtoků pomocí indikátorových metod

Ve velmi nepříznivých hydraulických podmínkách, kde se průtok nedá měřit hydrometrickou vrtulí, nebo při speciálně zaměřených měření je vhodné použít indikátorových metod. Při těchto metodách se označí část průtoků stabilními chemikáliemi nebo radionuklidy, které se pak sledují (indikují) v kontrolních profilech (KŘÍŽ A KOL, 1979).

Vzdálenost mezi profilem aplikace a měrným profilem je podmíněna charakterem a šířkou proudu. Podstatné je, aby bylo před měrným profilem dosaženo

dokonalého promísení traceru s proudem, tzn. vzdálenost byla delší, než směšovací délka (BOITEN, 2000).

Čím je tedy proud turbulentnější a užší, tím kratší může být úsek mezi profilem aplikace a měrným profilem. Pokud je úsek neúměrně dlouhý, je možné zvolit dávkování traceru ve více bodech příčného profilu aplikace a tak zkrátit směšovací délku. Pokud projde měrným profilem veškeré aplikované množství traceru a za podmínky konstantního průtoku během průchodu tracerového mraku měřeným úsekem, resp. profilem, můžeme psát:

$$M = V \cdot c_1 = Q \int_{t_a}^{\infty} c_2(t) dt$$

Kde M - množství traceru v aplikovaném roztoku [mg]

V - objem aplikovaného roztoku traceru

c - konduktivita roztoku traceru

(ADRIAN, 1991).

Metoda využívá ke stanovení průtoku tzv. stopovací látku (tracer). Ten je aplikován do proudu, kde dojde k jeho naředění v poměru k hledanému průtoku. Jde tedy o metodu postavenou na principu ředění. Hledaný průtok je určen pouze ze známého množství dávkovaného roztoku a ředícího poměru. Jako tracer bylo zvoleno NaCl. Oproti jiným stopovacím látkám má své nezastupitelné výhody. (ISO 9555, 1994).

Pořizovací hodnota traceru je zanedbatelná, je snadno dostupný. Jeho aplikace má minimální vliv na životní prostředí. Další podstatnou výhodou je dostupnost in-line analytické techniky s digitálním záznamem s vysokým časovým rozlišením, který je poměrně nenákladný, kompaktní a vhodný i do těžkého terénu. Použití indikátorové metody s sebou nese řadu ulehčení. Tím nejpodstatnějším je skutečnost, že není potřeba znát geometrii úseku ani jeho drsnosti. Lze ji použít kdekoli, kde situace neumožňuje tradiční řešení (pod ledem, při strmých sklonech, při malých průtocích) nebo tam, kde by tradiční měření znamenalo neúměrné náklady. Kritickým bodem aplikace metody je zvýšená hustota roztoku NaCl.H₂O, což může mít vliv na transportní vlastnosti média. Nicméně v plně vyvinutém

turbulentním proudění v kvadratické oblasti ztrát třením je tato negativní vlastnost. (ISO 9555, 1994)

2.5 Přesnost měření průtoků

Na přesnost změřeného průtoku působí řada náhodných a na sobě vzájemně závislých i nezávislých vlivů. Nejpřesnějších výsledků se dosahuje objemovým měřením průtoků a dále pomocí hydrometrické vrtule. Nejméně přesné jsou metody využívající neúplných měření a rychlostních vzorců, kde některé parametry se odvozují nepřímo nebo se stanoví odhadem. Na přesnost měření průtoků objemovým způsobem má vliv chyba ve stanovení objemu nádoby (nádrže), jejího naplnění při vlastním měření, chyba použitých stopek a vlastního měření. Další okolnosti, jako vliv změny teploty a vazkosti vody na přesnost objemového měření má druhořadý význam. Při zachování podmínek měření chyba nepřesahuje $\pm 1\%$. Chyba měření průtoků pomocí dobře konstruovaných přelivů, kde velikost součinitele přepadu se ověří cejchováním, je rovněž menší než $\pm 1\%$. Při malých tloušťkách přepadového paprsku může chyba přesáhnout $\pm 5\%$. Přesnost měření průtoků pomocí žlabů se udává $\pm (2-3)\%$ (CHAMRAD A KOL., 1982).

Na přesnost měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule má vliv tolerance tárovací rovnice (zvláště v úsecích, kdy závislost není lineární, především při malých rychlostech), turbulence pohybu vody vyvolávající pulsaci rychlosti proudění vody, počet a rozmístění měrných svislic a měrných bodů ve svislici, nepřesnost v měření hloubek a šířek a zjednodušení při výpočtových postupech. Podle některých srovnávacích měření bylo zjištěno, že rozdíly v délce měření bodových rychlostí 30 a 50 sekund ovlivňují stanovení průměrné profilové rychlosti ve vybrané pozorovací síti méně než $\pm 0,5\%$ (CHAMRAD A KOL. 1982).

Dále je nutné počítat s chybou hydrometrické vrtule, která se udává do $\pm 1\%$. Největší vliv na přesnost přímého měření průtoků má zjištění průtočné plochy. Chyby zde vznikají především nepřesným měřením hloubek vody v korytech s velkou drsností, případně použitím rozdílných měřících postupů (měření pomocí dělené tyče, na závěsu z lanovky apod.) Chyby ve stanovení průtočné plochy

v korytech s kamenitým dnem mohou přesáhnout $\pm 10\%$, naopak v korytech se dnem tvořeným písky a šterky chyba nepřesahuje $\pm 5\%$. Rovněž rozmístění měrných a sondovacích svislic může ovlivnit přesnost měření do $\pm 5\%$. Vliv přesnosti měřených šířek na stanovení plochy průtočného profilu se může ve větší míře projevit, jestliže průhyb měrného lanka (pásma) bude dosahovat 10% z šířky profilu, což se při dodržení doporučených postupů prakticky nevyskytuje. Jestliže se dodržují normativní pokyny pro měření průtoků hydrometrickou vrtulí ve vodním toku s volnou hladinou uvedené při popisu měření jednotlivých parametrů, bude střední kvadratická chyba při ustáleném proudění a příznivých podmínkách menší než $\pm 5\%$, v méně příznivých podmínkách chyba bude $\pm (5-10\%)$. Chyby stanovení průtoků pomocnými měřicími metodami a při použití rychlostních vzorců se mohou pohybovat v rozmezí několika desítek procent (KŘÍŽ, 1988).

3. Materiál a metody

3.1 Materiál

POVODÍ KOPANINSKÉHO TOKU

Pokusné povodí Kopaninského toku je sledováno Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. od roku 1985. Základní charakteristiky povodí jsou uvedeny v tab. 1. Z hlediska geomorfologického patří povodí do oblastí Českomoravské vrchoviny, celku Křemešnické vrchoviny, podcelků Želivské pahorkatiny a Humpolecké vrchoviny, na rozhraní okrsků Košetické a Vyskytenské pahorkatiny. Území náleží k erozně denudačnímu typu reliéfu.

Povodí Kopaninského toku, hydrologické číslo 1-09-02-031, je levostranným přítokem Jankovského potoka, součástí povodí říčky Hejlovky, která je přítokem řeky Želivky. Nalézá se v bývalém okrese Pelhřimov. Zeměpisná poloha místa vtoku Kopaninského toku do Jankovského potoka má souřadnice $49^{\circ} 28'$ s. š. a $15^{\circ} 17'$ v. d. Nadmořská výška v místě pramene Kopaninského toku je 578 m, v místě ústí toku 467 m, průměrná nadmořská výška Kopaninského toku je 523 m. Celé povodí leží severovýchodně od Pelhřimova ve výseči tvořené silnicemi I. třídy č. 34 a č. 19.

Rozloha povodí Kopaninského toku činí 6,9 km² s délkou toku 5,9 km a průměrným sklonem hlavní údolnice 2,6 %.

Povodí se nachází v klimatické oblasti vrchovinné, mírně teplé, mírně vlhké (B5) podle Končeka, resp. v klimatickém regionu 7 (MT4), mírně teplém a vlhkém podle klasifikačního systému BPEJ (MAŠÁT A KOL., 2002). Oblast B5 charakterizuje normální až krátké léto, mírné až mírně chladné, suché až mírně suché, přechodné období normální až dlouhé, s mírným jarem a podzimem, zima je normálně dlouhá, mírně chladná, suchá až mírně suchá s normální až krátkou sněhovou pokrývkou. Dlouhodobý průměr srážek $R = 665$ mm. Srážkový úhrn ve vegetačním období se pohybuje od 350 do 450 mm, v zimních měsících od 250 do 300 mm. Průměrná denní teplota vzduchu $t = 7$ °C, $t(\text{veg}) = 13$ °C. Počet letních dní je v zájmovém území 30 – 40, počet dní se sněhovou pokrývkou 60 – 100.

Geologický podklad je pararula. Povodí Kopaninského potoka je součástí hydrogeologického rajónu 652 – Krystalinikum v povodí Sázavy zahrnující povodí Želivky a povodí Sázavy po Zruč nad Sázavou. Horniny krystalinika mají puklinovou propustnost, která v dosahu zvětrávacích procesů závisí hlavně na charakteru zvětralin. Relativně lepší puklinovou propustnost mají granitoidy moldanubického plutonu vyskytující se v jižní části povodí. Z kvartérních sedimentů mají větší hydrogeologický význam fluviální akumulace sedimentů údolních niv a některá mocnější eluvia. Propustnost kvartéru se mění podle uloženin. Pro území jsou charakteristické mělké zvodně vázané na povrchovou zónu kvartérních uloženin, zónu zvětrávání, případně přípovrchového rozpojení hornin. Oběh vody má lokální charakter. Infiltrace probíhá v celé ploše kolektoru v závislosti na propustnosti zvětralinového pláště. K odvodňování dochází v úrovni nebo nad místní erozní bází.

Převažujícím půdním typem je kambizem kyselá, v nivních polohách půdy s různými stupni oglejení. Co se týče svažitosti pozemků převažují 2 až 5% v rozsahu až do 20%. Odvodněno je 10 % území, to je 82,5 ha, což je 16 % ze zemědělské půdy (ŽLÁBEK, 2009).

Tab. 1 - Základní charakteristiky povodí Kopaninského toku

Název toku	Kopaninský tok
Průměrná zeměpisná šířka	49° 28' S
Průměrná zeměpisná délka	15° 17' V
Nadmořská výška	467 - 578 (prům. 523) m n. m.
Plocha [km ²]	6,99
Délka toku [km]	5,9
Hydrologické pořadí toku	1-09-02-031
Nadřazené vodní toky	Jankovský potok, Želivka, Sázava, Vltava, Labe
% orné půdy	45
% TTP	13
% lesů	36
% odvodněných ploch	10
Průměrné roční srážky [mm]	665 (Humpolec, 1901-50)
Průměrná roční teplota [oC]	7,0 (Humpolec, 1901-50)
Horninové podloží	pararula
Převládající půdní typ	kambizem

MIKROPOVODÍ P52

Měření probíhalo na experimentálním území – Kopaninský potok na stanovišti P52 za účelem kalibrace měrného přepadu.

Tab. 2 - Mikropovodí P52

Kategorie využití území	Výměra [ha]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	0.44	0.68
Orná půda	20.30	31.16
Zahrady	0.41	0.63
Louky	0.06	0.09
Pastviny	0.81	1.25
Lesy	41.67	64.29
Vodní plochy	0.17	0.26
Ostatní plochy	1.06	1.64
Celková výměra	64.92	

Na stanovišti P52 je tok osazen kruhovou betonovou skruží, na které je umístěna telemetrická stanice. Před kruhovou skruží je vybudován Thomsonův přeliv (viz obr. 3.), na kterém bylo provedeno měření průtoků objemovou metodou.

Obr. 3 – Thomsonův přeliv



Foto: Ondřej Šebor

3.2 Metody

Kalibrací měrného přepadu se zabývá katedra krajinného managementu Jihočeské univerzity, pracovníci katedry provádějí na tomto přepadu v průběhu celého roku měření průtoku objemovou metodou. Kalibrování bylo prováděno na měrném přepadu P52 od ledna roku 2011 do února roku 2012 pětkrát, tato naměřená data mi byla poskytnuta ke zpracování. Osobně jsem se měření zúčastnil 14. listopadu 2011. Při tomto měření byly použity tři metody: 1. Hydrometrická vrtulka OTT, 2. Ultrazvukový měřič průtoku PCM, 3. Objemový průtokoměr.

3.2.1 Měření průtoku pomocí hydrometrické vrtule

Otáčející se osa vrtule spíná přímo (mechanicky, magneticky, opticky, příp. i jinak) nebo přes šnekový převod (mechanicky) kontakt, který ovládá počítadlo otáček (nebo u starších typů akustické signalizační zařízení – bzučák). Počítadlo se k vrtuli připojuje kabelem. Moderní vrtule zpravidla dávají jeden impuls na každou otáčku. Některé typy vrtulí, zejména speciální vrtule pro laboratorní použití (tzv. mikrovrtule s průměry propelerů pod 25-30 mm), dávají i více než jeden (laboratorní vrtule Delft např. 60) impulsů na otáčku, takže lze do jisté míry sledovat i parametry turbulence. Ze známého času a počtu otáček se pak z kalibrační rovnice určuje rychlost proudění. Existuje však i vrtule, u které propeler otáčí dynamem, takže výstupem nejsou impulsy, ale napěťový signál úměrný rychlosti (MATTAS, 2001).

Při měření se určuje počet otáček vrtule N za zvolený časový interval T (zejména u moderních vrtulí, které dávají signál po každé otáčce), nebo se měří čas T nutný k uskutečnění daného počtu otáček N (zejména u starých typů vrtulí, dávajících signál po více otáčkách). Některé typy počítadel dovolují volbu libovolného způsobu z obou (MATTAS, 2001).

Rychlost proudění v [ms^{-1}] v bodě se pak vypočte z kalibrační rovnice vrtule. Kalibrační rovnice je po částech lineární tvaru:

$$V_i = \alpha_i + \beta_i \cdot n$$

Kde $n = N/T$ [s^{-1}]

α_i, β_i - jsou kalibrační konstanty platné v uvedeném rozsahu specifických otáček

$n \in (n_{i1}, n_{i2})$ Počet dílčích lineárních úseků kalibrační rovnice je nejvýše roven třem. Konstanta β je blízká stoupání propeleru vrtule a konstanta α indikuje v případě prvního lineárního úseku kalibrační rovnice zhruba minimální rychlost, při které se vrtule začne otáčet.

(ČSN ISO 3455, 1993)

Tab. 4 - Měření průtoku pomocí hydrometrické vrtule

Výhody	Nevýhody
nízká poruchovost	občasná kalibrace
možnost vizuální kontroly	omezené možnosti měření
jednoduchost principu měření	nesnadná kontrola a kalibrace
vysoká spolehlivost	omezení měření vlivem vegetace, nebo nízkou hladinou
,	problémy s napájením
,	životnost baterií
,	,
Nejčastější chyby	
zachycení plovoucího splaví na propeler	
u starších typů vniknutí vody	
špatně stanovená závislost plochy na hloubce	
porucha popeleru při nárazu o dno.	
Vypadnutí kontaktu baterie z držáku	

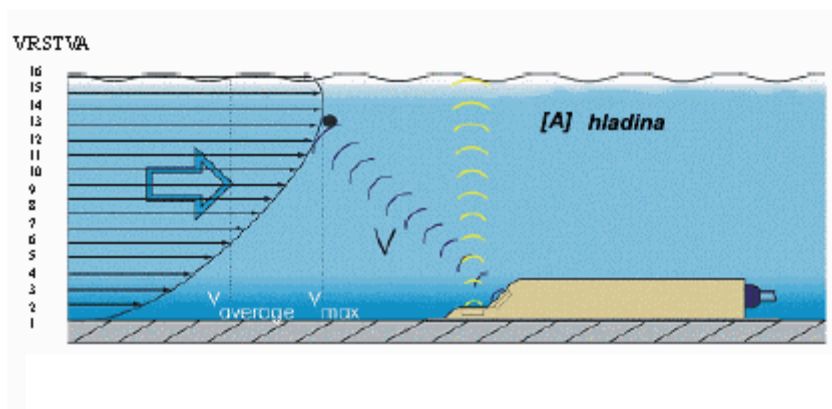
Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

3.2.2 Měření průtoku pomocí ultrazvukového měřiče

Přenosné zařízení umožňuje měřit průtok v potrubích plně nebo jen částečně zaplněných, v otevřených profilech pravidelných nebo nepravidelných tvarů. Přímou měřenou veličinou je profilová rychlost proudu vody a úroveň hladiny, dopočítává se průřezová plocha a průtok. (RIYAZ, STEFFEN, 2002)

Ultrazvukový senzor vysílá do měřeného média krátké impulsy ultrazvukového vlnění a po vyslání ultrazvukového impulsu se vždy krátce přepne z vysílání na příjem. Drobné částičky nečistot nebo bubliny plovoucí v kapalině tvoří překážky odrážející vlnění zpět k senzoru (viz. obr. 3). Z prodlevy mezi vysláním budícího impulsu a příjmem odrazů od jednotlivých překážek, dohromady tvořících odezvu na impuls (tzv. echo), lze určit okamžitou polohu částic (nečistot, bublin), od kterých se vlnění odrazilo. Zpracováním časové řady ech, lze zjistit rychlost pohybu jednotlivých částic, a tedy i rychlost kapaliny, kterou jsou unášeny (RIYAZ, STEFFEN, 2002).

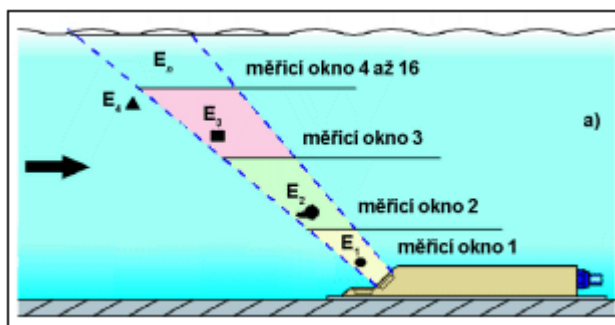
Obr. 3 - profil měřený čidlem



Zdroj: (<http://www.hydomeliorace.cz/projekty/qf3095/Kapitola2.html>)

Průtokoměr PCM sleduje okamžitou polohu částic unášených v kapalině (následně vyhodnocuje rychlostní profil a z něj skutečnou střední rychlost proudění), celkem v šestnácti vrstvách průtočného profilu (viz obr. 4).

Obr. 4 - Obraz proudění získaný zpracováním ultrazvukového echa v čase t



Zdroj: (<http://www.hydro-meliorace.cz/projekty/qf3095/Kapitola2.html>)

Přesnost přímého měření rychlosti je 1% (resp. 2-5 mm/m.s⁻¹), čidlo se umístí na dně měřeného profilu, min. výška vody při měření je 4cm, rychlosti jsou měřeny i v záporném směru (turbulence apod.) včetně rozsahu od nulové hodnoty, součástí přesného měření je úroveň hladiny (chyba 2 až 3mm), měření je realizováno ve vertikále, dělené až na 16 horizontů (pro výšku proudu do cca 50cm jich stanoví přístroj méně), měření lze realizovat v jedné vertikále jedním čidlem (doporučeno pro prizmatická koryta), jinak se přidávají další čidla v horizontále příčného profilu, případně se měří v několika sousedních vertikálách postupně. Měření je plně elektronické se záznamem do výměnných flash-pamětí, zařízení jsou stacionární i přenosná. (EICHLER, 2002).

Tab. 3 - Měření průtoku pomocí ultrazvukového měřiče

Výhody	Nevýhody
rychlá instalace	vyšší cena elektroniky
minimální úpravy koryta	nižší životnost než je u stavebních objektů
nulová hydraulická ztráta	nesnadná kontrola a kalibrace
možno měřit i neneutonskou kapalinu	měří se rychlost částic odrážející zvuk ve vodě a ne částic vody
,	rychlostní sonda pod vodou
,	časová nestálost nastavení elektroniky
Nejčastější chyby	
nevhodně zvolený profil (vysoké nebo nízké Froudovo nebo Reynoldsovo číslo)	
špatně provedená kalibrace rychlosti	
špatně stanovená závislost plochy na hloubce	
nesprávně stanovená úroveň nulového průtoku (tzv. "nula")	

Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

3.2.3 Objemové měření průtoků

Aplikovatelné na malých tocích, nejčastěji u měření vydatnosti pramenů, vodu zachytáváme do nádoby pod přepadem, pozorovatel zmáčkne stopky, nádoba se vloží pod přeliv a on měří čas naplnění, zná tedy čas naplnění a objem nádoby; mělo by se měřit 3x za sebou, bere se průměr naplnění nádoby. To by mělo trvat déle než 7s – důvod: eliminace reakční doby člověka (zmáčknutí stopek, 2009) Tabulka 5. popisuje hlavní charakteristiky měření pomocí ostrohranných přelivů (PARS AQUA, 2009).

Tab. 5 - Měření pomocí ostrohranných přelivů

Výhody	Nevýhody
jednoduchá a rychlá instalace do šachty	obtížná nebo neekonomická prefabrikace
vysoká přesnost měření	každý přepad je originálem s vlastním projektem
jednoduchá kontrola přesnosti měření	vysoký hydraulický spád
vysoká přizpůsobivost měrnému rozsahu	velký obestavěný prostor
,	zvýšené požadavky na uklidnění rychlostního pole
Nejčastější chyby	
nekvalitní výřez přelivu, přelivná hrana není ostrá (tloušťka je větší jak 1 mm), vrchol u trojúhelníkového přelivu není vybroušen	
nekvalitní geometrie přepadu, nakloněný přepad, poškozená hrana	
nejsou dodrženy požadavky na vytvoření úplné nebo částečné kontrakce proudnic (přelivná hrana nízko nad dnem, úzké koryto)	
nedostatečné odtokové podmínky (ovlivnění průtoku zpětným vzdutím)	
nezavzdušněný prostor pod přepadovým paprskem	
Podtékání	
nedostatečné uklidnění - vlnění, víry, nesymetrický přepadový paprsek	
neodborně sestavený vzorec $Q = fce(h)$	
při použití prefabrikátu chybí protokol o prvotní kalibraci	

Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

3.2.4 Popis vlastního měření

Měření bodových rychlostí

Důležité pro měření bodových rychlostí je:

- vhodný výběr profilu,
- přesné určení příčného profilu,
- volba počtu vertikál a měrných bodů.

Při výběru úseku byla vybrána nemeandrující část s průtokem veškeré vody toku v měřicím bodě. Profil koryta byl upraven na přímý úsek s pravidelným dnem a proudnicí kolmo na měrný profil.

Příčný profil toku byl změřen pomocí pásma a znivelován podle KŘÍŽE (1988) po cca 0,1 – 0,2 m (nivelace pro toky do cca 6 metrů šířky). Přičemž bylo zjištěno, že hloubka toku je kritická k měření hydrometrickou vrtulí i ultrazvukovým přístrojem.

Svislice byly umístěny v příčném profilu rovnoměrně ve vzdálenosti 0,2 m při šířce koryta 0,6 m podle NĚMCE (1965) (0,2 – 0,5 m pro malé vodní toky do 5m). Vyznačení měrných svislic bylo zkonstruováno geodetickými výtyčkami spojené lankem, na kterém se vyznačili pomocí pásma jednotlivé vzdálenosti.

Základní měření lze charakterizovat těmito požadavky:

- rychlosti proudění vody se měří nejméně v 75% sondovacích svislic,
- hloubka vody v měrné svislici je větší než pětinašobek průměru vrtule, měří se rychlost proudění vody v pěti nebo více bodech,
- měrné svislice s počtem 5 a více bodů mají dosahovat alespoň jednu polovinu všech měrných svislic v daném profilu,
- doba měření rychlosti proudění v měrném bodě je obvykle delší než u zkráceného měření, minimálně 50 sekund.

Další popis vyhodnocení měření bodových rychlostí je teoretický. Z důvodu malé rychlosti proudění a nedostatečné hloubky toku, nebyl na naměřená data aplikovatelný.

Vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení průtoku se dnes obvykle používají specializované počítačové programy, proto dále uvádím jen základní numerický postup (tzv. Harlacherovu metodu).

Numerický výpočet: kde v_s je svislicová rychlost (dvoubodová metoda)

$$v_s = 0,5 (v_{0,2H} + v_{0,8})$$

Průtočná rychlost v se vypočítá podle rovnice

$$v = a + b \cdot n$$

Kde: a, b - konstanty (dané hodnoty z kalibračního protokolu)

n - počet otáček za 1 sekundu

(MATTAS, 2001).

Průtočné množství vypočteme jako součet dílčích průtoků ΔQ v jednotlivých segmentech průtočného průřezu, které vymezují hloubky ve středu mezi měrnými svislicemi a šířky ΔB , jimž pak přiřazujeme hodnoty průměrných rychlostí v jednotlivých svislicích v_{st} , odečtených na čáře průměrných rychlostí ve svislici:

$$Q = \sum_1^n \Delta Q t = \sum_1^n S_i \cdot v_{st} = \sum_1^n h_1 \cdot \Delta B_i \cdot v_{st} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

Pouze u břehů, jestliže se vzdálenost první a poslední svislice nerovná $\frac{1}{2} \Delta B$, se místo naměřené hloubky ve svislici počítá s hloubkou:

$$\Delta h = \frac{S_o}{b_o} \quad (\text{m})$$

Kde S_o – plocha části průtočného profilu od břehu do vzdálenosti b_o

Střední průřezová rychlost se vypočte ze vztahu:

$$v = \frac{Q}{S}$$

(KREŠL, 2001)

Měření průtoků pomocí objemového průtokoměru pod ostrohranným přelivem

Důležité pro měření objemovým průtokoměrem:

- správné zvolení velikosti průtokoměru (doba plnění delší než 7 sekund),
- zachycení celého průtoku současně,
- břít přelivu musí být čistý.

Použitý průtokoměr se skládá z vaku na zadrženou vodu o velikosti 300 litrů, na jehož hrdle jsou dvě madla, dále z hadice, 2 uzávěrů a vodoměru. Jeden uzávěr je umístěný na dně zádržného vaku a druhý je součástí vodoměru.

Obr. 3 - Měření pomocí objemového průtokoměru



Foto: Ondřej Šebor

Doba plnění byla zvolena pomocí telemetrické stanice s ultrazvukovou sondou Fiedler – Mágr 1045. Vodoměrná stanice je usazena před ostrohranným přelivem v přímém úseku, kde měří průtok, výšku hladiny a teplotu vzduchu.

Po rozložení objemového průtokoměru na toku, byly rozděleny funkce, dvě osoby obsluhovaly průtokoměr a jedna měřila čas a zapisovala údaje o měření, přičemž v průběhu naplňování odečítala zaznamenané hodnoty na telemetrické stanici. Hrdlo průtokoměru bylo umístěno pod přeliv a bylo dbáno na to, aby byl zachycen celý průtok. Doba měření činila 3 minuty. Po vhodném umístění objemového průtokoměru ze svahu následovalo změření proteklého množství,

otevřením uzávěru na vodoměru. Po vyprázdnění celého objemu se odečetla naměřená hodnota z vodoměru, která se převedla na průtok, tedy na litry za sekundu. Měření se provedlo třikrát. Aritmetickým průměrem těchto hodnot bylo dosaženo průměrného průtočného množství v l/s.

Q-H křivka profilu

V profilech, kde dochází ke změně z říčního proudění na bystřinné, lze stanovit konzumpční křivku hydrometrováním jako závislost Q - h. Místo pro stanovení Q-h křivky se volí min. 3 h_{max} před místem, kde vzniká kritická hloubka.(PARS AQUA, 2009).

Přesnost stanovení konzumpční křivky je závislá na přesnosti zaměření průtoku, hladiny a stabilnosti nastaveného průtoku. Časová stálost rovnice je závislá na konstrukční a stavební stabilnosti měrného místa tj. místa se změnou režimu proudění. Výhodou této metody je rychlá realizace měření, nulová přídatná ztráta energie a dosažitelná vysoká přesnost).

Chyby měření

Kontrola chyb měření spočívá v porovnávání měření průtoků objemového průtokoměru, s naměřenými hodnotami telemetrické stanice.

Chyba měření Δ se udává v % a vypočítá se podle vztahu:

$$\frac{V_i - V_c}{V_c} \cdot 100$$

Kde: V_c - hodnota průtoku naměřená objemovým průtokoměru

V_i - je průtok zaznamenaný telemetrickou stanicí, při měření téhož objemu ve stejném čase (TPM 6621 – 97, 1997)

4. Výsledky

Objemové měření

Jak již bylo uvedeno, měření průtoků bylo provedeno objemovou metodou celkem v pěti termínech. Při těchto měřeních se zároveň zaznamenávaly hodnoty naměřené telemetrickou stanicí. Tyto hodnoty byly porovnány a následně byla sestrojena rovnice konzumpční křivky.

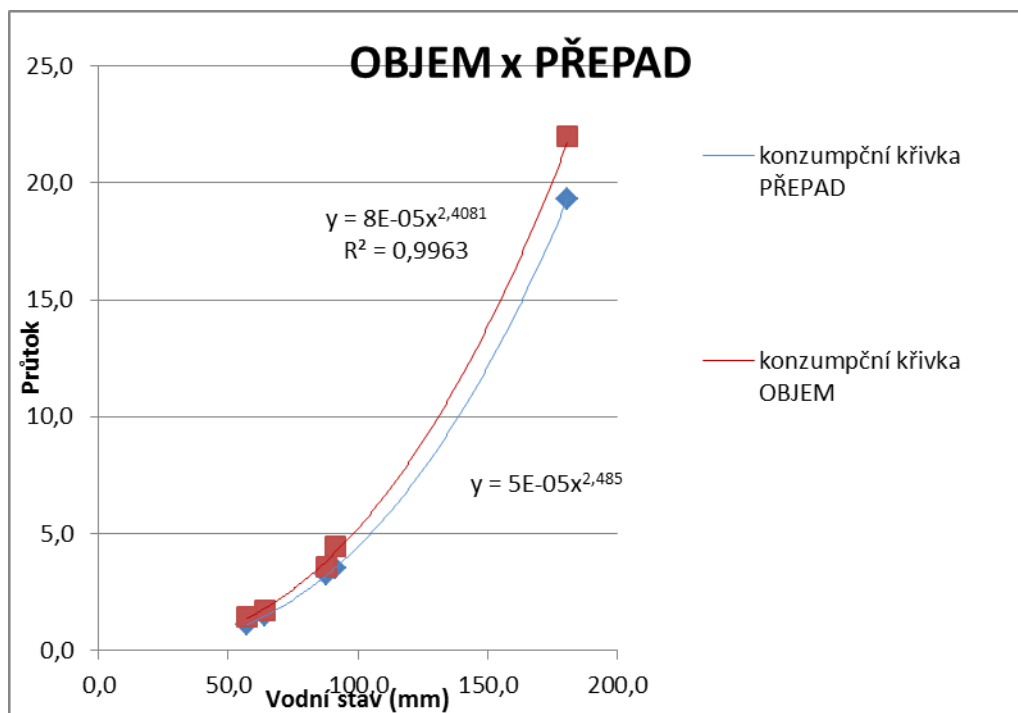
V tab. 4, průtok stanovený objemovou metodou pod ostrohranným přelivem s trojúhelníkovým výřezem, byl pro porovnání označen jako Q_OBJEM, a průtok telemetrické stanice jako Q_PŘEPAD. Vypočtený rozdíl obou měření byl označen jako rozdíl Δ .

Tab. 4 - Experimentálně naměřené hodnoty

P52					
DATUM	ČAS	VODNÍ STAV h (mm)	Q_PŘEPAD (l/s)	Q_OBJEM (l/s)	rozdíl Δ (%)
10.1.2011	15:44	87,9	3,2	3,6	-9,3
14.1.2011	16:20	180,7	19,3	22,0	-12,3
30.10.2011	12:14	64,1	1,5	1,7	-13,0
14.11.2011	13:20	57,1	1,1	1,5	-24,1
27.2.2012	15:30	91,3	3,5	4,4	-20,1

Přepočtené hodnoty průtoku a přepadové výšky zaznamenané v tabulce 4, byly vyneseny do grafu 1, kde je znázorněna závislost průtoku na výšce hladiny konzumpčními křivkami.

Graf 1 - porovnání telemetrické stanice a objemového průtokoměru



Na grafu 1 je patrné, že nejmenší odchylka měření je při malých vodních stavech. S nárůstem průtoku a vodního stavu se nejistoty zvyšují.

Na základě objemového měření byla stanovena nová rovnice konzumpční křivky pro profil, která má tvar lineární regresní rovnice $y = 8E - 05x^{2,4081}$. Z důvodu vysoké věrohodnosti kontrolních měření (dlouhá doba napouštění objemového průtokoměru), bude rovnice dále využíváno pro hydrologický výzkum na daném povodí.

Měření bodových rychlostí

Dne 14. listopadu 2011 byly po předchozí domluvě zapůjčeny přístroje PCM a hydrometrická vrtule. Z obr 4. a 5. je zřejmé, že vodní stav toku byl kritický pro měření jak hydrometrickou vrtulí tak i pro ultrazvukový přístroj.

Hydrometrická vrtule ani ultrazvukový přístroj PCM není zařízení na měření rychlosti proudění při minimálních stavech, ale primárně při normálních a vyšších.

I když je z výsledků měření objemovým průtokoměrem zřejmé, že 14. ledna 2011 byl průtok v korytě dostatečný pro měření hydrometrickou vrtulí a ultrazvukový průtokoměr, nejsou tyto přístroje ve vlastnictví fakulty a v tomto termínu se je nepodařilo zajistit. Další příčinou nezískání aplikovatelných dat pro vyhodnocení měření, je odezva povodí na srážkovou situaci, která je zde ovlivněna sklonitostí území a bývá velice rychlá.

Obr. 4 - Hydrometrická vrtule



Foto: Ondřej Šebor

Obr.5 – PCM



Foto: Ondřej Šebor

5. Závěr

Cílem práce bylo především zpracovat rešerši jako kvalitní informační podklad pro pokračování v rámci diplomové práce. Dílčím cílem bylo vybrat vhodný měrný přepad, který je osazen zařízením pro kontinuální měření průtoků a na něm provést kontrolní měření jinými metodami. V rámci projektu NAZV QH82095 byl vedoucím práce vybrán profil, na kterém bylo potřeba zkalibrovat rovnici konzumpční křivky.

Na tomto profilu byla provedena série měření průtoků objemovou metodou (speciálně upraveným velkoobjemovým vakem) při různých vodních stavech. Výsledky těchto měření byly použity k sestrojení nové konzumpční křivky. Rozdíly kontinuálního a bodového měření se pohybovaly mezi 9 a 24 procenty.

Při jednom objemovém měření bylo rovněž provedeno hydrometrování dvěma metodami – hydrometrickou vrtulkou a ultrazvukovou sondou. Aktuální vodní stav bohužel nevyhovoval ani jedné z použitých metod.

V rámci navazující diplomové práce budou objemovým měření zkalibrovány další měrné přepady. Dále bude cílem provést měření průtoků více metodami najednou za vodních stavů vyhovujících všem metodám zároveň.

6. Literatura:

1. Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1991, 261-304 s.
2. Bezdíček, V.: *Hydrologie*, EVUT Brno, 1966, 251 s.
3. Boiten, W.: *Hydrometry*, IHE Delft Lecture Note, Balkema, Rotterdam 2000, 246 s.
4. ČSN 75 0101.: *Vodní hospodářství - Názvosloví hydrologie*. Česká technická norma. Vydal: Český normalizační institut, Praha, 2003, 23 s.
5. ČSN ISO 3455.: *Měření průtoků kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích*, Praha, 1993, 42 s.
6. Dub, O.: *Hydrologie*. SNTL Praha, 1969, 380 s.
7. Eichler, J.: *Vyhodnocení měření průtoků přístrojem OCM Pro*, Praha, 2002.
8. Haloun, R.: *Modelování odtoku z intravilánu*. ČVUT Praha, 1993, 126 s.
9. Chamrad, V., Kříž, V., Litschmann, T.: *Přesnost měření průtoků hydrometrickou vrtulí se zřetelem k technice měření a vyhodnocení výsledků*. Sborník prací svazek 27. Praha, 1982.
10. ISO 9555.: *Measurement of liquid flow in open channels - Tracer dilution*
11. Jenčík, J.: *Ultrazvukové průtokoměry*. *Automatizace*. Ročník 41, číslo 5, Praha, 1998, 300 – 303 s.
12. Kadlec, K.: *Snímače průtoků – principy, vlastnosti a použití*. *Odborný časopis Automa – snímače a převodníky*. Praha, 2006, 29 s.
13. Krešl, J.: *Hydrologie*, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2001, 128 s.
14. Kříž, V. a kol.: *Hydrometrie*, Praha 1988, 176 s.
15. Kříž, V., Kupčo, M., Sochorec, R.: *Hydrometeorologický ústav Praha, SNTL Praha, 1979, 148 s.*
16. Kunštátský, J., Patočka, C.: *Základy hydrauliky a hydrologie*. SNTL Praha, 1966, 250 s.
17. Mašát, K., Němeček, J., Tomiška, Z.: *Metodika vymezení a mapování bonitovaných půdně ekologických jednotek*. VÚMOP Praha, Praha, 2002, 113 s.

18. Mattas, D.: Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách. Výzkum pro praxi. VÚV T.G.M., Praha 1998, 37 s.
19. Mattas, D.: Praktické cvičení z hydrometrie, ČVUT v Praze, katedra hydrauliky a hydrologie, Praha, 2001, 24 s.
methods for the measurement of steady flow. ISO, Geneve, 1995.
20. Němec, J.: Hydrologie. SZN Praha, 1965, 237 s.
21. PARS Aqua s.r.o.: Odborný článek o měření průtoků, článek č.12, Praha, 2009, 40 s.
22. Patočka, C.: Hydraulika, skriptá Fsv ČVUT Praha, 1977, 154 s.
23. Pelikán, V. a kol.: Hydrogeologická měření. SNTL Praha. 1988, 219 s.
24. Preisler, B., Kroupa, Z., Mykišková, M.: Měření množství a průtoku v automatizaci, SNTL Praha, 1967, 164 s.
25. Riyaz J., Steffen L.: Methods of Flow Measurement for Water and wastewater. Zpracováno pro NIVUS Inc. 3rd edition, 2002.
26. Schröder, W., Euler, G., Schneider, K., Knauf, D.: Grundlagen des Wasserbaus, 3. Auflage, Werner Verlag 1994.
27. Sotorník, V.: Cejchování hydrometrických vrtulí, Vodní hospodářství, 1975, 220-223 s.
28. Strnad, R.: Trendy měření průtoku. Vydal GAS s.r.o., 2004
29. Technický předpis metrologický TPM 6621 – 97.: Měření průtoku vody v uzavřených potrubích. Měřidla pro studenou pitnou vodu – metody zkoušení, Praha, 1997.
30. Van Leer, B.R.: Pipe Method of Water Measurement. Eng. News-Rec., California, 1924.
31. Žlábek, P.: Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku, Disertační práce, ZF JČU České Budějovice, 2009, 106 s.
32. Žoužela, M.: Modelový a provozní výzkum vestavěného prvku pro měření průtoku v systémech prizmatických koryt s volnou hladinou, VUT FAST Ústav vodních staveb, Brno, 1999. 20 s.
33. Žoužela, M., Šulc, J.: Metodický návod pro výpočty nejistot při provádění měření za účelem stanovení průtoků a posuzování funkční způsobilosti měřidel, 2. vydání, LVV FAST VUT Brno, 2001, 40 str.

34. <http://www.hydromeliorace.cz/projekty/qf3095/Kapitola2.html> „staženo dne 14. března 2012“.