

**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Studijní program: Povrchová a podzemní voda



**Kamila Tučanová**

**Metody měření průtoku vody v povrchových tocích**

Methods of Streamflow Measurement

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Mgr. Martin Slavík, Ph.D.

Konzultant: RNDr. Miroslav Šobr, Ph.D.

Praha 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 28.7.2021

.....

Kamila Tučanová

## Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému školiteli Martinovi Slavíkovi za všechny cenné rady a připomínky, které mi během psaní práce poskytl, a za velkou pomoc, ochotu a trpělivost, kterou mi při konzultacích a měřeních mnohokrát projevil. Děkuji také Miroslavu Šobrovi za velkou pomoc a rady při měření průtoku v terénu, stejně tak Janu Jirákovvi za rady při výběru povrchových toků vhodných k měření a pomoc při sběru dat. Velké poděkování patří i mé rodině, obzvláště mé mamince, že mě během celého studia podporovala.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se v rešeršní části zabývá často využívanými metodami měření průtoku (rychlostní metody, chemická metoda, objemová metoda, metody zúžení toku, metoda výpočtu ze známého průběhu hladiny a měrná křivka průtoku). Na základě rešerše dostupné odborné literatury jsou představeny jednotlivé metody z hlediska správné metodiky měření a výpočtu průtoků, typu toků, na kterých je nevhodnější vybrané metody používat, a také výhod, nevýhod a očekávaných přesností. V rámci praktické části práce byla provedena měření vybranými metodami (hydrometrická vrtule, FlowTracker, plováková metoda a chemická metoda) na 3 tocích nižšího řádu opatřených vodoměrnou stanicí Českého hydrometeorologického ústavu. Hodnoty průtoků získané jednotlivými metodami byly porovnány s průtoky dle vodoměrných stanic a zároveň mezi sebou. Výsledné odchylky hodnot průtoků byly konfrontovány s přesnostmi jednotlivých metod představenými v rešeršní části práce a diskutovány. Na základě 14 hodnot průtoku bylo zjištěno, že na vybraných tocích dosahuje největší přesnosti FlowTracker (relativní odchylka do 12 %) a naopak nejnižší chemická metoda (relativní odchylka až 25 %). Interpretaci komplikuje nízké rozlišení vodoměrných stanic, které může značně nadhodnocovat relativní odchylky. Pro přesnější závěry by bylo vhodné provést větší množství měření s využitím vodoměrných stanic s vyšším rozlišením.

**Klíčová slova:** měření průtoku, rychlostní metody, chemická metoda, vodoměrné stanice

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses in its review part on commonly exploited methods of discharge measurement (velocity–area methods, dilution method, volumetric method, formed constriction methods, slope–area method and rating curve). The principle of discharge measurement and calculation, advantages, disadvantages, and accuracies of individual methods, as well as the type of stream suitable for different method, are reviewed in theoretical part of the thesis based on available literature. In the practical part of the thesis, measurements with selected methods (current meter, FlowTracker, float method and dilution method) were made on 3 lower order streams equipped with Czech Hydrometeorological Institute gauging stations. Discharges collected with individual methods were compared with one another and with the discharges from the gauging stations. Resulted deviations of discharge values were confronted with the accuracies of individual methods presented in the review, and discussed. It was determined, based on 14 values of discharge, that on selected streams, the highest accuracies were reached with FlowTracker (relative deviation up to 12 %). Dilution method had lowest accuracies (relative deviation up to 25 %). The interpretation of the results is complicated due to low resolution of the gauging stations, which may lead to noticeable overestimating of the relative deviation. In order to reach more accurate conclusions, it would be appropriate to make more measurements with the use of higher resolution gauging stations.

Key words: discharge measurement, velocity–area method, dilution method, gauging stations

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 1  |
| 2. Popis metod měření průtoku .....                         | 2  |
| 2.1 Rychlostní metody .....                                 | 2  |
| 2.1.1 Hydrometrická vrtule .....                            | 3  |
| 2.1.2 Plováková metoda .....                                | 8  |
| 2.1.3 FlowTracker .....                                     | 12 |
| 2.1.4 ADCP .....  | 14 |
| 2.2 Chemická metoda .....                                   | 17 |
| 2.2.1 Druhy stopovačů .....                                 | 17 |
| 2.2.2 Příprava měření .....                                 | 18 |
| 2.2.3 Princip měření .....                                  | 19 |
| 2.3 Objemová metoda .....                                   | 21 |
| 2.3.1 Výběr nádoby .....                                    | 21 |
| 2.3.2 Výběr měrného profilu .....                           | 22 |
| 2.3.3 Postup měření .....                                   | 22 |
| 2.4 Metoda výpočtu průtoku ze známého průběhu hladiny ..... | 23 |
| 2.4.1 Hydraulický poloměr .....                             | 24 |
| 2.4.2 Sklon hladiny .....                                   | 24 |
| 2.4.3 Manningův koeficient drsnosti .....                   | 24 |
| 2.4.4 Chézyho rychlostní součinitel .....                   | 25 |
| 2.5 Metody zúžení toku .....                                | 26 |
| 2.5.1 Měrné přelivy .....                                   | 27 |
| 2.5.2 Měrné žlaby .....                                     | 28 |
| 2.6 Měrná křivka průtoků .....                              | 29 |
| 2.6.1 Vodní stav .....                                      | 29 |
| 2.6.2 Tvorba měrné křivky .....                             | 30 |
| 3. Terénní práce – popis měření .....                       | 31 |
| 3.1 Botič (Praha – Nusle) .....                             | 33 |
| 3.2 Žehrovka (Březina) .....                                | 34 |
| 3.3 Libuňka (Sedmihorky) .....                              | 35 |
| 4. Terénní práce – Výsledky měření .....                    | 37 |
| 4.1. Botič (Praha – Nusle) .....                            | 38 |
| 4.2 Žehrovka (Březina) .....                                | 39 |

|   |    |
|---|----|
| 4.3 Libuňka (Sedmihorky).....   | 40 |
| 5. Diskuse .....  | 41 |
| 5.1 Srovnání výsledků jednotlivých metod .....  | 42 |
| 5.2 Výsledky chemické metody.....   | 43 |
| 5.3 Srovnání relativní odchylky jednotlivých metod s přesností uváděnou v literatuře..... | 45 |
| 6. Závěr.....   | 46 |
| 7. Použitá literatura .....   | 48 |
| 8. Seznam obrázků .....   | 53 |
| 9. Seznam tabulek .....   | 53 |
| 10. Přílohy .....   | 54 |

# 1. Úvod

Průtok je jednou z nejvýznamnějších hydrologických veličin. Představuje objem vody, který za jednotku času proteče zvoleným profilem toku. Nejčastějšími jednotkami, ve kterých je průtok vyjádřen, jsou  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  nebo  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  (Kemel a Kolář, 1980). Znalosti o průtoku jsou důležité z mnoha důvodů. Slouží jako základní informace pro odběratele vody, lodní dopravu, vypouštění odpadních vod, vodohospodářský management v městských i rurálních oblastech a pro určení srážkovo-odtokových režimů jednotlivých povodí (Boiten, 2005). Průtok dále poskytuje informace pro vyhodnocení přírodních ohrožení jako jsou sucho nebo povodně (Acreman, 2001; Dobriyal et al., 2017).

Obor, který se zabývá měřením průtoku a dalších hydrologických veličin, se nazývá hydrometrie. Zahrnuje metody měření, měřicí přístroje a postupy pro zpracování dat (Kříž et al., 1988). Různé typy koryt se od sebe velmi liší svými charakteristikami, jako jsou šířka, hloubka, sklon, rychlost a typ proudění a přítomnost překážek v toku. Proto bylo k měření průtoku vynalezeno mnoho postupů, které mají rozdílnou metodiku, náročnost použití i přesnost (John, 1978; Dobriyal et al., 2017).

Měření průtoku podléhá celé řadě pravidel a doporučení, které vyplývají z odborných publikací (např. Kříž et al., 1988; Boiten, 2005) či jsou dány normami (např. ISO 748, 2007). Při nedodržování těchto pravidel či při použití nevhodné metody mohou vznikat chyby měření, kterých je bez dalšího ověřování obtížné si povšimnout. Odborné zdroje se při popisu jednotlivých metod navíc místy rozcházejí v doporučené metodice, uvedených přesnostech nebo v typech toků, na kterých je danou metodu nejvhodnější použít.

V této práci se v teoretické části budu zabývat rychlostními metodami, chemickou metodou, objemovou metodou, metodami zúžení toku, metodou výpočtu ze známého průběhu hladiny a měrnou křivkou průtoků. Cílem bakalářské práce je uceleně představit tyto metody měření průtoku povrchových toků. V rešeršní části se zaměřím na princip měření, výhody, nevýhody a přesnost jednotlivých metod. Zároveň ke každé metodě uvedu, na kterých typech vodních toků je dle literatury nejvhodnější ji použít.

V praktické části provedu měření běžně využívanými metodami určenými k jednorázovému měření (hydrometrická vrtule, FlowTracker, chemická metoda, plováková metoda) na několika vybraných profilech, které jsou osazeny vodoměrnou stanicí Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMÚ). Výsledky měření jednotlivými metodami porovnám mezi sebou a

určím, jak se od sebe vzájemně liší a jak se liší od hodnot z vodoměrné stanice ČHMÚ. To poté zkonfrontuji s poznatky zjištěnými v rešeršní části práce. Tyto informace poskytnou určitou představu o tom, jaká může při měření vznikat nejistota, ačkoliv měření provádí poučená osoba při dodržování pravidel a doporučení z literatury a při využití kalibrovaných a řádně spravovaných přístrojů.

## 2. Popis metod měření průtoku

### 2.1 Rychlostní metody

Tyto metody měření průtoku, známé též jako metody proměření rychlostí a průtočné plochy, jsou založené na změření průtočného profilu a rychlosti proudění. Výpočty průtoku  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) vychází z konceptu popsaného rovnicí (Boiten, 2005; 1):

$$Q = v_p \times A \quad (1)$$

kde  $v_p$  je průměrná rychlost proudění ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $A$  je průtočná plocha ( $\text{m}^2$ ) (Boiten, 2005). K výpočtu průměrné rychlosti proudění se nejčastěji používají hydrometrické vrtule, plováky a přístroje pracující na principu Dopplerova jevu – ADCP a FlowTracker (Dobriyal et al., 2017). Princip měření pomocí těchto metod, jejich výhody a nevýhody a vhodnost použití v různých podmínkách jsou popsány v následujících podkapitolách.

Pro přesné změření průtoku je nejprve klíčový správný výběr průtočného profilu, na kterém bude prováděno měření. Průtočný profil by měl být vytyčen v místě, kde je koryto rovné (je doporučeno, aby byl přímý úsek toku nad profilem dlouhý alespoň  $5b$  a pod profilem alespoň  $2b$ , přičemž  $b$  je šířka toku) (Boiten, 2005), má rovnoměrný hloubkový a rychlostní profil, dostatečnou hloubku pro plné ponoření měřičů a stabilní břehy a dno. Směry proudění toku by měly být po celé šířce kolmé na průtočný profil (ISO 748, 2007). V blízkosti průtočného profilu by proudění mělo být bez vírů a větších turbulencí a dno pravidelné bez větších překážek (John, 1978). Pokud je průtočný profil nevyhovující, lze jej před měřením upravit např. odstraněním větších balvanů a vegetace, případně prohloubením dna. Je vhodné takto upravit i krátký úsek nad průtočným profilem, aby nedocházelo ke tvoření vírů za většími překážkami, které by zasahovaly do místa měření (Kříž et al., 1988; Mattas, 2001).



### 2.1.1 Hydrometrická vrtule

Hydrometrická vrtule je přístroj, kterým se bodově měří rychlost proudění vody. Dělí se podle orientace osy na vrtule s horizontální osou (tzv. propelerového typu) a vrtule s vertikální osou (tzv. miskovitého typu). Vrtule s horizontální osou, která se používá hlavně v Evropě, svou konstrukcí navazuje na původní Woltmannovu vrtuli s lopatkovým propelerem, navrženou v roce 1787 německým inženýrem Reinhardem Woltmannem, zatímco vrtule s vertikální osou (konstrukčně podobná anemometru) se využívá zejména v USA, kde byla vyvinuta (ČKSVV, 2021). Z důvodu lepší dostupnosti a historické blízkosti se budu dále zabývat jen vrtulí s horizontální osou. Vrtule s horizontální osou (obr. 1) se skládá z propeleru otočného kolem pevné osy, ložisek a signálního zařízení, které pomocí kabelů přenáší údaje o otáčkách propeleru do počítačového zařízení (ČSN ISO 2537, 1993). Propelery jsou vyrobeny z odolného materiálu a mají různé průměry a stoupání, přičemž platí, že s rostoucí rychlostí proudění roste stoupání propeleru, který je vhodné použít. Pro měření na potocích a menších mělkých řekách je vrtule připevněna k soutyčí, v případě větších řek se spouští do vody na laně (Boiten, 2005).



Obr. 1. Hydrometrická vrtule Ott C-2 na soutyčí s propelerem velikosti 5

Vztah, který platí mezi rychlostí toku a počtem otáček propeleru, udává kalibrační rovnice (ČKSVV, 2021; 2)

$$v = \alpha + \beta n \quad (2)$$

kde  $v$  je rychlost proudění ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $n$  je frekvence otáček (poměr počtu otáček ku časovému intervalu) a  $\alpha$ ,  $\beta$  jsou kalibrační konstanty (ČKSVV, 2021). Daná kalibrační rovnice platí jen pro určité rozmezí specifických otáček vrtule. Jednotlivé proměnné v rovnici se určí při kalibrační proceduře, kdy je hydrometrická vrtule připevněna k pojízdnému vozíku a

opakovaně tažena bazénem s klidnou vodou za měření počtu otáček a rychlosti vozíku. V České republice provádí kalibrace Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí (ČKSVV) při Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka (dále jen VÚV) v Praze (ČKSVV, 2021). K opětovné kalibraci vrtule by mělo dojít po 300 hodinách provozu (ČSN ISO 2537, 1993) nebo po výměně jakékoli součástky tvořící vrtuli (Mattas, 2001).

Měření pomocí vrtule se na vybraném průtočném profilu provádí tak, že se nejprve od jednoho břehu k druhému napne měřicí pásmo či lanko, ze kterého se odečte šířka profilu. K odečtení hloubek potřebných k určení plochy průtočného profilu se využívá sondovací tyč nebo soutyčí hydrometrické vrtule (Kemel a Kolář, 1980). Měření rychlosti proudění pomocí hydrometrické vrtule se provádí bodově, kdy jednotlivé body leží na svislici. Počet svislic, kterými se průtočný profil pravidelně rozdělí na několik částí, se liší v závislosti na šířce toku. Minimální dostatečný počet svislic pro danou šířku toku je uveden v tabulce 1. Pokud je v průtočném profilu nepravidelné dno nebo některou dílčí plochou protéká více než 10 % celkového průtoku, je potřeba pro odstranění nepřesností zvýšit počet svislic nad rámec tabulky 1 (Kříž et al., 1988; ISO 748, 2007).

*Tabulka 1. Minimální počet svislic podle šířky toku (ISO 748, 2007)*

| šířka toku b                      | minimální počet svislic |
|-----------------------------------|-------------------------|
| $b < 0,5 \text{ m}$               | 5-6                     |
| $0,5 \text{ m} < b < 1 \text{ m}$ | 6-7                     |
| $1 \text{ m} < b < 3 \text{ m}$   | 7-12                    |
| $3 \text{ m} < b < 5 \text{ m}$   | 13-16                   |
| $b > 5 \text{ m}$                 | $\geq 22$               |

Názory autorů na délku trvání bodového měření pomocí hydrometrické vrtule se různí. Obecně platí, že čím delší je měření, tím větší je jeho přesnost (John, 1978). Shaw (1994) uvádí délku měření 60 s, dle Kříže et al. (1980) je dostačující délka 50 s, v případě nutnosti rychlejšího měření z důvodu hrozící změny vodního stavu pak 30 s. Dle normy ISO 748 (2007) je minimální délka měření 30 s.

Existuje několik metod, jak vypočítat průměrnou rychlost proudění na svislici (v některé literatuře uvedeno jako střední svislicová rychlost). Počet bodových měření na svislici závisí na hloubce toku. Od toho se odvíjí metoda potřebná k výpočtu průměrné rychlosti na svislici. Na toku o hloubce do 0,25 m lze použít jednobodovou metodu, od 0,25 m do 0,5 m

dvoubodovou, u větších hloubek pak tří- a vícebodovou (Boiten, 2005). Dle Mattase (2001) jsou však za příznivých podmínek (přímý úsek, pravidelný rychlostní profil) třibodová a pětibodová metoda z hlediska přesnosti srovnatelné. K výpočtu průměrné rychlosti  $v_p$  na svislici dle jednotlivých metod se využijí následující rovnice 3–6 (Boiten, 2005), kde číselný dolní index značí hloubku ode dna v procentech,  $v_d$  je rychlost u dna a  $v_h$  rychlost u hladiny:

$$\text{jednobodová metoda} \quad v_p = v_{0,4} \quad (3)$$

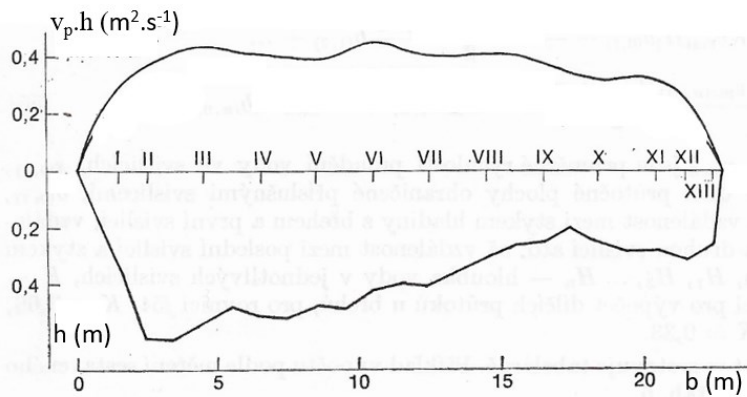
$$\text{dvoubodová metoda} \quad v_p = \frac{1}{2}(v_{0,2} + v_{0,8}) \quad (4)$$

$$\text{třibodová metoda} \quad v_p = \frac{1}{4}(v_{0,2} + 2v_{0,4} + v_{0,8}) \quad (5)$$

$$\text{pětibodová metoda} \quad v_p = \frac{1}{10}(v_d + 3v_{0,2} + 2v_{0,4} + 3v_{0,8} + v_h) \quad (6)$$

Jednobodová metoda se měří v hloubce 0,4 ode dna proto, že při parabolickém vertikálním rozložení rychlostí (tedy rozložení, které se předpokládá u většiny povrchových toků), se střední svislicová rychlost nachází právě v této hloubce (Boiten, 2005).

K vyhodnocení průtoku lze použít grafickou, graficko-početní a numerickou metodu. Grafická metoda výpočtu průtoku (obr. 2) spočívá v tom, že se nad hladinu zobrazeného průtočného profilu vynesou na svislicích vypočtené průměrné rychlosti proudění vynásobené hloubkou v dané svislici. Tyto hodnoty se spojí plynulou křivkou a velikost vzniklé plochy, ohraničené křivkou a hladinou, reprezentuje celkový průtok. Velikost průtoku se zjistí planimetry (Kříž et al., 1988).

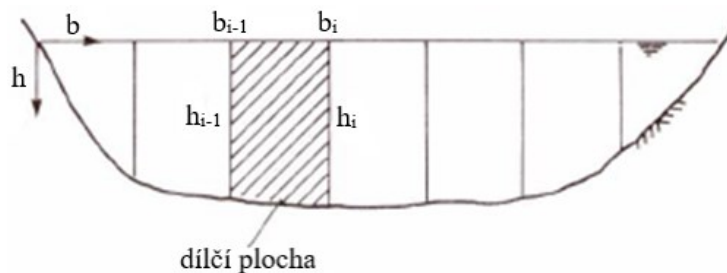


Obr. 2. Schéma výpočtu průtoku grafickou metodou, kde  $h$  je hloubka a  $b$  šířka toku  
(upraveno dle Kříže et al., 1988)

Při použití graficko-početní metody se zobrazený průtočný profil rozdělí na dílčí průtočné plochy, na kterých se vypočítávají dílčí průtoky, jejichž sečtením se získá celkový průtok. Jeden ze způsobů, jak získat dílčí průtok, je vypočítat průtok mezi dvěma svislicemi průměrovou metodou (obr. 3) pomocí rovnice (Shaw, 1994; 7):

$$Q_d = \frac{v_{p_{i-1}} + v_{p_i}}{2} * \frac{h_{i-1} + h_i}{2} (b_i - b_{i-1}) \quad (7)$$

kde  $v_{p_i}$  je průměrná rychlost proudění na svislici,  $h_i$  je hloubka na svislici a  $b_i$  je vzdálenost svislice od břehu, na kterém se začalo měřit. Tento způsob je v anglické literatuře znám jako tzv. *mean section method*.



Obr. 3. Schéma rozdělení profilu na dílčí průtočné plochy podle průměrové metody (upraveno dle Shaw, 1994)

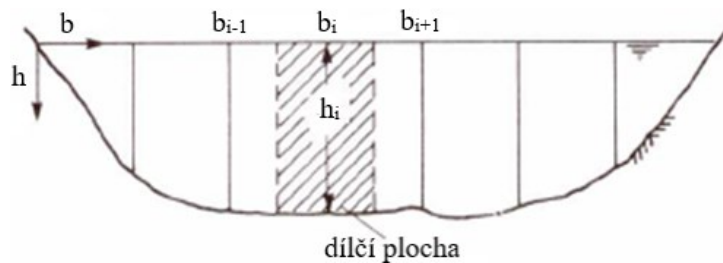
Druhý způsob získání dílčího průtoku spočívá ve vypočtení průtoku středovou metodou na ploše mezi body odpovídajícími polovině vzdálenosti sousedních svislic (obr. 4) pomocí rovnice (Shaw, 1994; 8):

$$Q_d = v_{p_i} h_i \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2} \quad (8)$$

a je v anglické literatuře znám jako tzv. *mid section method* (Shaw, 1994). Tato metoda počítá dílčí průtoky v celé šířce měrného profilu, kromě malých oblastí kolem obou břehů, kde je průtok zanedbán. Aby byl zanedbaný průtok co nejmenší, navrhuje Shaw (1994) umístit první (poslední) svislici co nejbližší k jednomu (druhému) břehu. Další možností je vypočítat dílčí průtok u břehu pomocí rovnice (SonTek, 2019; 9):

$$Q_d = v_{p_0} h_0 \frac{b_1 - b_0}{2} \quad (9)$$

kde dolní index 0 značí hodnoty průměrné rychlosti a hloubky u břehu.



Obr. 4. Schéma rozdělení profilu na dílčí průtočné plochy podle středové metody (upraveno dle Shaw, 1994)

Průtok lze také vypočítat numericky, a to pomocí rovnice (Mattas, 2001; 10):

$$Q = k v_{p_1} h_1 b_1 \sum_1^{n-1} \frac{v_{p_i} h_i + v_{p_{i+1}} h_{i+1}}{2} (b_{i+1} - b_i) k v_{p_n} h_n b_n \quad (10)$$

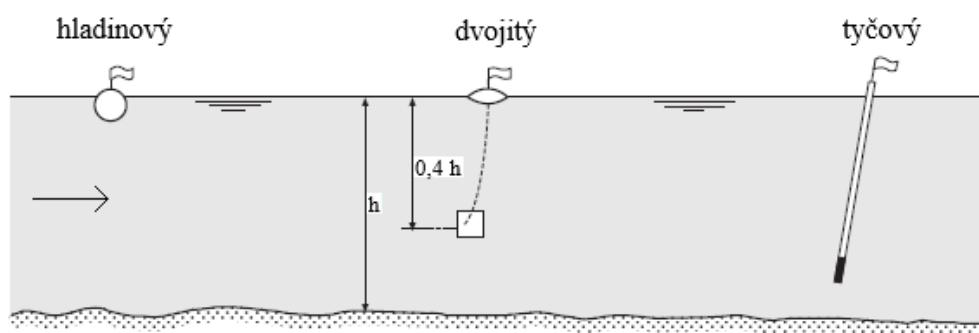
kde k je součinitel upravující průtok u břehu,  $k=0,33$  a n je počet měrných svislic. K výpočtu průtoku touto metodou slouží specializované počítačové programy (Mattas, 2001).

Hydrometrická vrtule se obecně hodí k použití na málo turbulentních tocích s běžnými průtoky, malým množstvím splavenin a s minimem vegetace (De Doncker et al., 2008; Tazioli, 2011). Přesnost měření pomocí vrtule závisí na přesnostech měření jednotlivých komponent (hloubka, vzdálenost od břehu a rychlost proudění), stejně jako na volbě měrného profilu či počtu svislic. Přesnější měření probíhají na ne příliš mělkých tocích s pravidelným korytem a většími rychlostmi proudění (John, 1978; Boiten, 2005). De Doncker et al. (2008) udávají přesnost měření 2–5 %, pro Mattase (2001) jsou optimální měření s přesností do 5 %, přičemž u umělých kanálů může přesnost dosahovat pod 1 %. Při zhoršených podmínkách měření bude dle Kříže et al. (1988) přesnost dosahovat až 10 %.

Výhodami hydrometrické vrtule jsou její vysoká přesnost a skutečnost, že pro poučeného operátora jde o jednoduchý způsob měření průtoku (Tazioli, 2011). Celé měření může provést jeden člověk, přítomnost druhého pracovníka zapisujícího výsledky ovšem výrazně zrychluje měření. Nevýhodou vrtule pak je vyšší pořizovací cena přístroje a nutnost časté nákladné kalibrace (Gees, 1990; Dobriyal et al, 2017).

### 2.1.2 Plováková metoda

Plováková metoda je jednou z nejstarších a nejjednodušších metod měření rychlosti proudění vody v povrchových tocích. Je založena na předpokladu, že unášené těleso (plovák) se ve vodním toku pohybuje stejnou rychlostí jako okolní vodní částice (Kemel a Kolář, 1980). Pro měření rychlostí plovákovou metodou lze použít následující typy plováků: hladinové, dvojité a tyčové (obr. 5; Boiten, 2005).

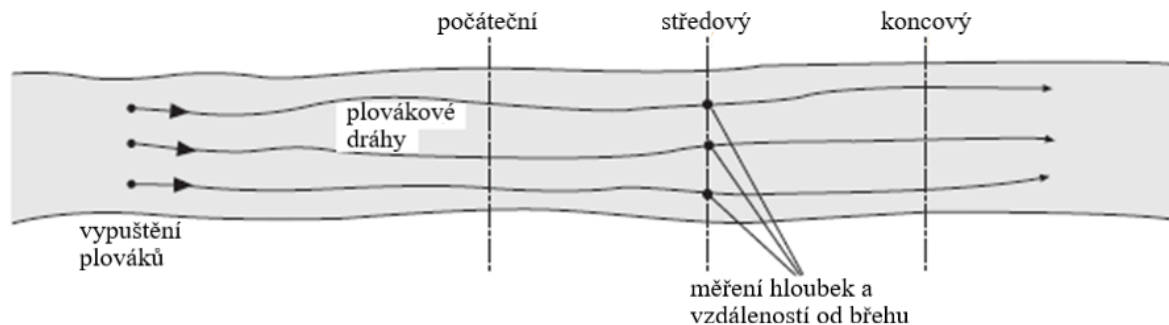


Obr. 5. Typy plováků (upraveno dle Boitena, 2005)

Jako hladinové plováky lze použít kusy dřeva, částečně naplněné lahve (Kemel a Kolář, 1980), případně pomeranče a jiné předměty, jejichž ponořená část dosahuje maximálně do 25 % hloubky toku (Boiten, 2005). Neponořená část nesmí být ovlivněna větrným prouděním. Dvojitý plovák vznikne spojením hladinového a hlubinného plováku tak, aby se hlubinný plovák po ponoření nacházel v hloubce, pro kterou bude reprezentovat rychlost proudění. Nejčastěji se umísťuje do hloubky střední svislicové rychlosti, tedy do hloubky  $0,4$  ode dna (Boiten, 2005). Tyčovým plovákem je lať, která je na jednom konci zatížená (Kemel a Kolář, 1980), a svou délkou dosahuje od hladiny alespoň do  $0,95$  hloubky toku (do  $0,05$  ode dna) (ISO 748, 2007). Všechny typy plováků musí být dobře viditelné na dálku a v případě, že se po měření z toku nesbírají, vytvořeny z přírodních materiálů (Harrelson et al., 1994).

Jelikož nejjednodušší a nejběžnější je používání hladinových plováků, budu se věnovat zejména jim. Měření rychlostí pomocí plováků se provádí na přímém měrném úseku, který je ideálně alespoň  $2-5\times$  delší než šířka toku (Kříž et al., 1988). Tento úsek by měl splňovat vlastnosti

úseku toku s průtočným profilem popsané v úvodu kapitoly 2. Na měrném úseku se vytyčí 3 měrné profily (obr. 6) kolmé na směr proudění – počáteční, středový a koncový (Kříž et al., 1988). Mezi počátečním a koncovým měrným profilem se měří čas proplutí plováku. Předpokládá se, že průměrnou rychlost mezi počátečním a koncovým profilem představuje rychlost plováku při proplutí středovým profilem, proto se na středovém profilu měří hloubka a vzdálenost od břehu použité později při výpočtu průtočné plochy (Boiten, 2005). Doba proplutí plováku mezi počátečním a koncovým profilem by měla být nejméně 20 s (ISO 748, 2007). V dostatečné vzdálenosti nad počátečním měrným profilem (dle Kemela a Koláře (1980) 5–10 m, dle Kříže et al. (1988) 10–15 m) se vytyčí profil, ze kterého budou vypouštěny plováky. Profily se označí měrným lankem nebo pásmem (Kemel a Kolář, 1980).



Obr. 6. Schéma měření rychlosti proudění pomocí plovákové metody s uvedením počátečního, středového a koncového profilu (upraveno dle Boitena, 2005)

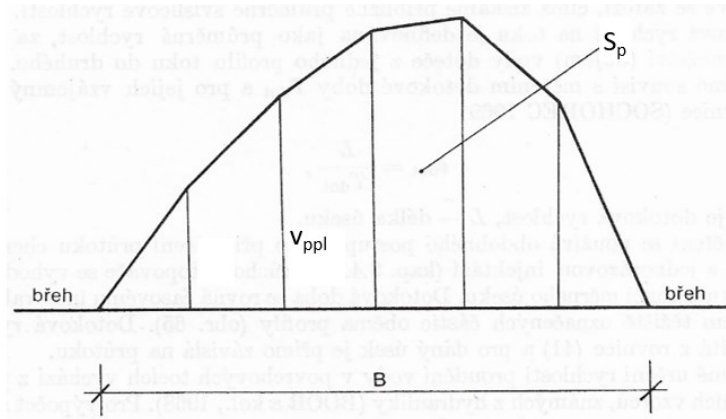
Při měření rychlostí po celé šířce toku závisí počet drah, na kterých jsou vypouštěny plováky, na šířce toku. U toků o šířce menší než 20 m se doporučuje minimálně 3–5 drah, u širších toků pak dráha každých 5–10 m (Kříž et al., 1988). Na zvolené dráze se vypustí plovák a měří se čas  $t$  (s), za který urazí vzdálenost  $L$  (m) mezi počátečním a koncovým profilem. Z těchto údajů se vypočítá rychlost plováku  $v_{pl}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) podle rovnice (Boiten, 2005; 11):

$$v_{pl} = \frac{L}{t} \quad (11)$$

Měření by se v každé dráze mělo podle Kříže et al. (1988) opakovat 2–3×, Harrelson et al. (1994) však uvádějí, že pro vyšší přesnost by se mělo měření na jedné dráze opakovat 5–10×. V případě výrazného vybočení plováku z dráhy se měření vyloučí (Kříž et al., 1988). Z průměru měření se získá průměrná rychlost plováku v dané dráze  $v_{ppl}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) (Kříž et al., 1988). Průměrná povrchová rychlost proudění  $v_{pp}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) se získá tak, že se  $v_{ppl}$  vynesou do polygonu (obr. 7), jehož plocha  $S_p$  se vypočítá a dosadí do rovnice (Kříž et al., 1988; 12):

$$v_{pp} = \frac{S_p}{B} \quad (12)$$

kde B je šířka toku na středním profilu (m).



Obr. 7. Schéma vynesení průměrných rychlostí plováku do polygonu (upraveno dle Kříže et al., 1988)

Pokud nelze povrchové rychlosti plováku měřit v celé šířce toku, lze změřit maximální povrchovou rychlost plováku. Takový případ může nastat na horských tocích, kde jsou plováky sváděny do proudnice (Kemel a Kolář, 1980). Plovák se místo různých drah opakovaně vypouští v proudnici a měří se čas, za který urazí vzdálenost L. Maximální povrchová rychlost plováku se vypočítá podle rovnice 11. Měření se v takovém případě opakuje minimálně 3–5× a maximální povrchová rychlost toku se spočítá jako průměr 3 nejrychlejších měření (Mattas, 2001). Při použití dvojíých nebo tyčových plováků se vypočítané rychlosti přibližně rovnají středním svislicovým rychlostem (Kříž et al., 1988).

V případě použití hladinových plováků lze k výpočtu průtoku použít rovnici (Mattas, 2001; 13):

$$Q = \kappa v_{pp} S \quad (13)$$

kde  $\kappa$  je korekční koeficient (bezrozm.) převádějící průměrnou povrchovou rychlost proudění na střední profilovou rychlost a S je průtočná plocha (m<sup>2</sup>). Průtočná plocha se vypočítá pomocí naměřených hloubek a vzdáleností od břehu. Koeficient  $\kappa$  nabývá různých hodnot v závislosti na vlastnostech toku a plováku. Pro daný tok bývá zpravidla určen pomocí hydrometrické vrtule (Mattas, 2001). Pokud není znám, lze ho určit orientačně podle literatury. Koeficient  $\kappa$  pro různé plováky podle ISO 748 (2007) je uveden v tabulce 2.



Tabulka 2. Hodnota koeficientu  $\kappa$  podle typu plováku (ISO 748, 2007)

| typ plováku | koeficient $\kappa$ |
|-------------|---------------------|
| hladinový   | 0,84 – 0,90         |
| dvojitý     | 0,96 – 1,0          |
| tyčový      | 0,8 – 1,0           |

Hodnotu korekčního koeficientu  $\kappa$  lze získat i výpočtem. Nejčastěji se používá Železnjakovův vzorec (Mattas, 2001; 14), případně rovnice (Kemela a Kolář, 1980; 15):

$$\kappa = 1 - \frac{5,8}{v_{pp}} \sqrt{hi} \quad (14)$$

kde  $h$  je střední hloubka toku (m) a  $i$  je sklon hladiny (bezrozm.),

$$\kappa = \frac{C}{C + 6} \quad (15)$$

kde  $C$  je Chézyho rychlostní součinitel ( $m^{0,5} \cdot s^{-1}$ ). K výpočtu průtoku lze použít i metody popsané v kapitole 2.1.1, tedy průměrovou metodu a středovou metodu, kde se průměrná rychlost na svislici  $v_{pi}$  získá přenásobením průměrné rychlosti plováku  $v_{ppl}$  korekčním koeficientem  $\kappa$  (Boiten, 2005).

Pokud je naměřena pouze maximální povrchová rychlost proudění, využívá se pro výpočet průtoku rovnice (Mattas, 2001; 16), kde  $\lambda$  je korekční koeficient (bezrozm.) a  $v_{pmax}$  maximální povrchová rychlost ( $m \cdot s^{-1}$ ):

$$Q = \lambda v_{pmax} S \quad (16)$$

Koeficient  $\lambda$  se vypočítá buď Železnjakovovým vzorcem (Mattas, 2001; 17), nebo rovnicí (Mattas, 2001; 18):

$$\lambda = 1 - \frac{17,54}{v_{pmax}} \sqrt{hi} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{C}{1,34C + 6} \quad (18)$$

Dle Kemela a Koláře (1980) dosahuje  $\lambda$  na nížinných tocích s dobrými podmínkami proudění hodnot 0,55–0,77 a na tocích s překážkami a turbulentnějším prouděním hodnot 0,43–0,65.

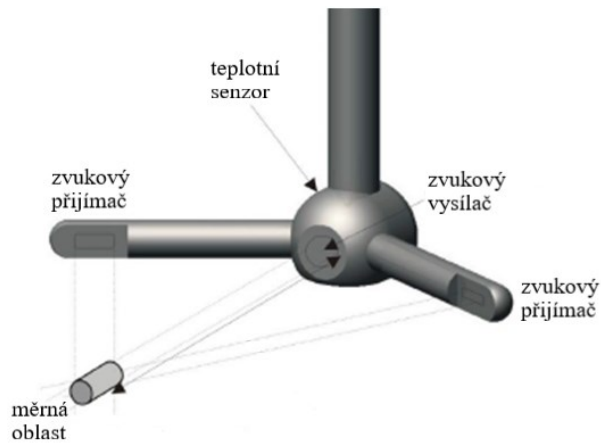
Plováková metoda slouží hlavně k přibližnému určení průtoku při průzkumu, případně se používá tam, kde nelze použít přesnější metody. Jedná se o příliš nízké nebo příliš vysoké rychlosti proudění, pro které není vrtule určená, případně lze plováky odhadovat průtok při povodních (John, 1978; Mattas, 2001). Dobriyal et al. (2017) píše, že lze plovákovou metodu používat jen na malých tocích, norma ČSN ISO 8363 (1993) ji ovšem doporučuje používat spíše na středních a velkých tocích. Mezi zdroje nepřesností vznikajících při měření patří nejčastěji nevhodně zvolený korekční koeficient, příliš málo měrných drah nebo odklon plováku z měrné dráhy, přičemž podobně jako u vrtule mohou vzniknout nepřesnosti při měření hloubek a vzdáleností od břehu (ISO 748, 2007). John (1978) uvádí za dobrých podmínek přesnosti plovákové metody kolem 10 %, Kříž et al. (1988) ale tvrdí, že nepřesnosti měření mohou dosahovat až několika desítek %.

Výhodou plovákové metody je její jednoduchost – není nutné s sebou nosit specializované vybavení, jako plovák lze často použít materiál už přítomný na místě (Mattas, 2001), měření dokáže provést i nezkušený pracovník, další výhodou je nízká cena měření (John, 1978; Harrelson et al., 1994). Nevýhodou je malá přesnost měření (Boiten, 2005) a potřeba alespoň dvou pracovníků, lépe ale tří.

### 2.1.3 FlowTracker

Jednou z moderních metod měření průtoku je měření pomocí přístroje FlowTracker. FlowTracker byl vyvinut společností SonTek a v současnosti je na trhu již jeho druhá generace (SonTek, 2018). Pomocí FlowTrackeru se měří rychlost vodou unášených částic (sediment, drobné organismy), protože se předpokládá, že jejich rychlost je stejně vysoká jako rychlost proudění vody. Ke kvalitnímu měření je tedy potřeba dostatečné množství vodou unášených částic (Rehmel, 2007).

Mezi hlavní součásti FlowTrackeru patří sonda, kabel, tyč a výpočetní zařízení. Sonda se skládá z jednoho vysílače a několika přijímačů zvukového signálu (obr. 8). Existují 2D sondy se dvěma přijímači vyhodnocující pohyb částic v horizontálním směru a 3D sondy se třemi přijímači schopné vyhodnotit pohyb částic i ve vertikálním směru. Měření rychlosti pomocí FlowTrackeru je založeno na principu Dopplerova jevu (SonTek, 2019).



Obr. 8. 2D sonda FlowTrackeru (upraveno dle Sontek, 2019)

Dopplerův jev popisuje zdánlivou změnu frekvence zvuku vydávaného zdrojem oproti frekvenci zvuku zachyceného přijímačem způsobenou vzájemným pohybem zdroje a přijímače. Tento jev byl poprvé popsán rakouským fyzikem Christianem Dopplerem v roce 1842 a v současnosti nachází využití zejména v radarech a astronomických měřeních (Britannica, 2021). Výpočet rychlosti proudění vychází z rovnice (SonTek, 2019; 19):

$$f_D = f_z \times \frac{v_z}{c} \quad (19)$$

kde  $f_z$  je frekvence zvuku vydávaného zdrojem (Hz),  $f_D$  je změna frekvence způsobená Dopplerovým jevem (Hz),  $v_z$  je rychlost zdroje vzhledem k přijímači ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $c$  je rychlost zvuku ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Rychlost zvuku je závislá na teplotě vody, díky údajům z teplotního senzoru na sondě (obr. 8) dochází k automatické korekci rychlosti zvuku (SonTek, 2019).

Měření rychlostí unášených částic pomocí FlowTrackeru se provádí na průtočném profilu, jehož vlastnosti co nejlépe odpovídají ideálnímu průtočnému profilu popsanému v úvodu 2. kapitoly. Podobně jako u měření hydrometrickou vrtulí se kolmo na tok napne pásmo, a postupuje se od jednoho břehu k druhému. Na průtočném profilu se zvolí svislice, na kterých se měří hloubka, vzdálenost od břehu a rychlost unášených částic (SonTek, 2019). Minimální počet svislic se řídí platnou normou (ISO 748, 2007) a je uveden v tabulce 1. Před vlastním měřením rychlosti se na svislici změří hodnoty hloubky a vzdálenosti od břehu, které se zadají do přístroje. Na svislici se jednotlivá měření rychlosti částic provádí bodově. K výpočtu průměrné rychlosti na svislici se zvolí některá z metod, FlowTracker nabízí mimo jiné přednastavenou jedno-, dvou-, a třibodovou metodu, které jsou popsány v kapitole o

hydrometrické vrtuli. Délku jednotlivých měření lze nastavit, dle manuálu je dostačující interval 40–60 s (SonTek, 2019).

Z vypočítaných průměrných rychlostí na svislici a údajů o hloubce a vzdálenosti od břehu přístroj vypočítá průtok. K výpočtu průtoku FlowTrackerem se využívají tři metody – průměrová a středová metoda (detailně popsané v kapitole 2.1.1) a tzv. japonská metoda (SonTek, 2019). Japonská metoda se od dvou zbylých liší jak výpočtem, tak měřící procedurou. U toků, jejichž šířka je větší než 10 m, se rychlost měří jen v každé druhé svislici, ve všech se měří hloubka a vzdálenost od břehu. Dalším specifikem japonské metody je, že se každé měření (hloubky, rychlosti) provádí 2×, a při výpočtu průtoku se průměrují (SonTek, 2019).

FlowTracker je měřením bodově na svislici podobný hydrometrické vrtuli a je tedy vhodný k měření na podobných profilech jako v případě vrtule. Přesnost měření průtoku závisí na přesnosti určení hloubek, vzdáleností od břehu, počtu svislic, rychlosti proudění (je uváděna přesnost měření rychlosti 1 %), dalšími faktory ovlivňujícími přesnost jsou rychlost zvuku a geometrie sondy (Rehmel, 2007; SonTek, 2019). Huhta a Sloat (2007) uvádí, že každé měření průtoku pomocí FlowTrackeru s přesností do 5 % lze považovat za úspěšné. FlowTracker bývá označen podobně jako hydrometrická vrtule za velmi přesnou metodu měření průtoku, Šebová et al. (2010) tvrdí, že hodnoty průtoků změřené oběma přístroji na stejných profilech jsou srovnatelné.

Výhod používání FlowTrackeru je mnoho. Má jednoduchou údržbu, neobsahuje pohyblivé části a změří i velmi malé rychlosti proudění, které už nezaznamená hydrometrická vrtule. Nemusí docházet k pravidelné recalibraci, kalibrace FlowTrackeru je jednorázová a opakuje se pouze při poškození přístroje (Morlock a Fisher, 2002). Velkou výhodou je skutečnost, že přístroj v průběhu měření sám upozorňuje na nepřesnosti, jako jsou odklon sondy od hlavního směru proudění či přítomnost překážky ovlivňující měření, což umožňuje operátorovi okamžitě postižená měření opakovat a zpřesnit. FlowTracker je oproti hydrometrické vrtuli rychlejší, průtok vypočítá software automaticky ihned po skončení měření (Šebová et al., 2010). Nevýhodou FlowTrackeru je jeho vysoká cena, která často výrazně převyšuje cenu hydrometrické vrtule. Jelikož ke svému měření potřebuje dostatek suspendovaných sedimentů, použití v čistých vodách bývá obtížné (Morlock a Fisher, 2002).

#### 2.1.4 ADCP

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) představuje jeden z moderních přístrojů využívaných k výpočtu průtoku. Princip měření je podobně jako u FlowTrackeru založen na

měření rychlosti ve vodě suspendovaných částic s využitím Dopplerova jevu a je popsán v předchozí podkapitole. První úzkopásmová ADCP byla používána už v 70. letech minulého století především na měření proudění v oceánských proudech a v estuáriích, protože vyžadovaly hloubku min. 3–4 m. V roce 1992 byl představen širokopásmový přístroj schopný měřit v podstatně mělčích vodách, a v různých provedeních se využívá stále častěji (Yorke a Oberg, 2002). Existují pohyblivá ADCP připevněná na člunu měřící od hladiny směrem ke dnu a ADCP instalovaná na dně měřící vzhůru (Boiten, 2005). Jelikož je měření pomocí pohyblivého ADCP mnohem častější (Muste et al., 2004), budu se dále zabývat pouze tím.

Mezi nezbytné vybavení potřebné k měření rychlosti proudění touto metodou patří ADCP transduktor (vysílač a přijímač zvukového signálu), počítač s potřebným softwarem a plavidlo. ADCP je bezdrátově propojeno s počítačem a posílá mu data v reálném čase. Velikosti ADCP se pohybují mezi 0,3–1 m s hmotnostmi až několika desítek kg v závislosti na výrobci a použití. Jako plavidlo nesoucí menší ADCP lze použít katamaránový plovák či malý člun, který se ovládá motorem na dálkové ovládání, nebo je tažen na laně (obr. 9). Taková ADCP je vhodné použít na menších tocích s malými hloubkami. Větší ADCP vhodná k měření na velkých tocích jsou připevňována na motorový člun (Yorke a Oberg, 2002).



*Obr. 9. Měření pomocí ADCP taženého na laně (foto: M. Slavík)*

Měření pomocí ADCP probíhá tak, že se přístroj na vhodně zvoleném průtočném profilu (viz. kapitola 2) kolmém na směr proudění pohybuje konstantní rychlostí od jednoho břehu ke druhému (De Doncker et al., 2008). Průtočný profil se rozdělí na soustavu pravidelně rozmístěných buněk o předem definovaných rozměrech. K měření rychlosti proudění dochází přes celou výšku každé buňky. Výsledná hodnota rychlosti proudění pro danou buňku se získá zprůměrováním naměřených rychlostí v dané buňce (Teledyne, 2011). Soubor buněk

položených v řadě nad sebou představuje pomyslnou svislici. Výsledkem jednoho měření ADCP od břehu ke břehu je soubor těchto svislic, tzv. transekt, který představuje průtočný profil v místě měření rozdělený na buňky s přiřazenými rychlostmi proudění. Jeden transekt obvykle obsahuje alespoň 2–3× více svislic, než na kolik je rozdělen průtočný profil při měření hydrometrickou vrtulí (Boiten, 2005).

ADCP nejsou schopná měřit rychlosti proudění v blízkosti dna a břehů, protože zvuk, který se od nich odráží, se mísí se zvuky odraženými od plovoucích částic. Pomocí ADCP nelze měřit rychlosti ani v blízkosti hladiny. Hlavními faktory jsou hloubka ponoru přístroje a slepá vzdálenost, na které přístroj nic nezměří. Typická slepá vzdálenost od transduktoru je kolem 0,25 m, ponor přístroje je v závislosti na výrobci a upevnění až 1 m. Rychlosti proudění v nezměřitelných oblastech se musí odhadnout, součástí softwaru ADCP jsou funkce, které to dokážou (Yorke a Oberg, 2002).

Průtok je počítán okamžitě v průběhu měření, a je součtem průtoku vypočítaného z naměřených rychlostí a hloubek a odhadnutého průtoku kolem dna, břehů a hladiny (Mueller a Wagner, 2009). Je doporučeno za stálých podmínek udělat na daném místě měření průtoku minimálně 2–4×, zprůměrováním opakovaně naměřených průtoků se získá průtok konečný. Pokud se ovšem podmínky toku rychle mění, např. při povodních, je možné udělat měření jen jednou (Yorke a Oberg, 2002).

Přístroj ADCP je vhodný zejména k měření průtoku na velkých a hlubokých tocích a tam, kde by měření konvenčními metodami typu hydrometrické vrtule byla nemožná (povodně) nebo příliš dlouhá a obtížná. U ADCP jsou tři hlavní skupiny nepřesností: nepřesnosti související s přístrojem a softwarem, nepřesnosti vyvolané prostředím a nepřesnosti způsobené operátorem (Muste et al., 2004). Mueller a Wagner (2009) uvádí, že přesnost ADCP je srovnatelná nebo lepší v porovnání s konvenčními metodami a ADCP také poskytuje lepší výsledky při měření průtoku za nestabilních podmínek.

Jednou z výhod měření pomocí ADCP je provádění rychlého a přesného měření na velkých tocích i za nepříznivých podmínek (Yorke a Oberg, 2002). Další výhodou je možnost ovládní menších ADCP z břehu použitím motoru nebo tažného lana bez nutnosti vstupovat do toku (Mueller a Wagner, 2009). Nevýhodou přístroje je vysoká pořizovací cena a potřeba zkušeného operátora, jakožto i nutnost odhadnout průtok kolem dna, hladiny a břehů (Yorke a Oberg, 2002; Dobriyal et al., 2017).

## 2.2 Chemická metoda

Jednou z metod zjišťování průtoku, známou minimálně od druhé poloviny 19. století, je měření chemickou metodou (Boiten, 2005), nazývané také jako metoda měření pomocí stopovačů. Stopovači jsou nazývané látky, které svou přítomností umožňují sledování pohybu vody. Dělí se na environmentální (dostávající se do prostředí přirozenými procesy) a umělé, které se do prostředí injektují v rámci experimentu. K měření průtoku se využívají stopovače umělé (Leibundgut a Seibert, 2011), proto se dále budu zabývat jen jimi. Princip metody spočívá v tom, že se průtok dopočítá podle míry rozředění použitého stopovače (Boiten, 2005). Látka využívaná jako stopovač se v ideálním případě v prostředí chová a pohybuje stejným způsobem jako voda. Mezi základní požadavky na vlastnosti stopovače patří: dobrá rozpustnost, stabilita ve vodě a v prostředí (nedochází k rozkladu a srážení stopovače nebo jeho adsorpci na povrch sedimentů a vegetace), dobrá detekce i v nízkých koncentracích, zdravotní nezávadnost a dostupná cena (Kříž et al., 1988; Shaw, 1994).

### 2.2.1 Druhy stopovačů

V současnosti používané umělé stopovače se dělí do tří skupin: barevné (někdy také nazývány fluorescenční), radioaktivní a chemické. Barevné stopovače se vyznačují tím, že jsou schopné fluorescence: po absorbování světelného záření o určité vlnové délce emitují světelné záření o jiné vlnové délce (Leibundgut a Seibert, 2011). Radioaktivní stopovače jsou látky, které mají některé atomy nahrazené radioisotopy, které podléhají radioaktivnímu rozpadu (IAEA, 2021). Chemické stopovače představují dobře rozpustné soli, jejichž ionty jsou v roztoku dobře měřitelné (Kříž et al., 1988).

Mezi nejběžněji používané barevné stopovače patří uranin a rhodamin (Boiten, 2005). Jejich výhodou je snadná detekovatelnost i při velmi nízkých koncentracích (Kříž et al., 1988), v případě uraninu až 2 ng/l (Käss et al., 1998), nevýhodou pak zvýšená adsorpce na jílovité sedimenty v kontrastu s jinými stopovači (Tazioli, 2011). Jako stopovače lze použít některé radioaktivní izotopy (např.  $^3\text{H}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) (Tazioli, 2011). Výhodou těchto stopovačů je možnost použití v silně znečištěných vodách, ve kterých se kvůli možnosti sorpce nedají použít jiné stopovače (Shaw, 1994). Nevýhoda radioaktivních stopovačů je, že jejich používání je limitováno kvůli možnému negativnímu vlivu na prostředí a organismy a je nutné žádat souhlas příslušných úřadů (Kříž et al., 1988; Tazioli, 2011). Mezi využívané chemické stopovače patří např. chloridy ve formě NaCl a dichromany ve formě  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  či  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Ke stopování jsou obecně vhodnější anionty, protože se adsorbují podstatně méně na jílové minerály než kationty (Kříž et al., 1988). Výhodami chemických stopovačů jsou dobrá dostupnost a příznivá cena

vzhledem k ostatním stopovačům, nevýhodami pak časté vysoké pozadové koncentrace v tocích a možná sorpce na jílové minerály (Leibundgut a Seibert, 2011; Tazioli, 2011).

Výběr vhodného stopovače podléhá podmínkám dostupnosti, ceny, hydrologickým charakteristikám toku, chemickému složení vody nebo minerálnímu složení suspendovaných sedimentů (Tazioli, 2011). V této práci se budu detailněji zabývat měřením pomocí stopovače NaCl, protože se jedná o látku, která je velmi často využívána a snadno dostupná, levná pro člověka i prostředí bezpečná v používaném množství (Boiten, 2005; Tazioli, 2011).

### 2.2.2 Příprava měření

Při měření průtoku se vybraný stopovač injektuje na zvoleném profilu do toku a v dostatečné vzdálenosti se na dolním profilu měří jeho koncentrace (Tazioli, 2011). Vlastnosti měřeného toku by měly být takové, aby co nejlépe umožňovaly dobré promísení stopovače s vodou, tedy turbulentní proudění, spíše malá šířka a větší hloubka toku a absence stojatých vod (Kilpatrick and Cobb, 1985). Vzdálenost injektážního profilu a dolního měrného profilu musí být taková, aby se stopovač v toku dostatečně promísil. V literatuře se vyskytuje pojem vzdálenost promísení  $L$  (m) (Bell, 1969) a lze ji zjistit výpočtem pomocí některého z řady vzorců. Příkladem mohou být Hullova (Bell, 1969; 20) nebo Dayova (Boiten, 2005; 21) rovnice:

$$L = a \times Q^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$L = 25 \times B \quad (21)$$

kde  $a$  je konstanta, která nabývá hodnoty 150 při injektáži doprostřed toku a hodnoty 600 při injektáži u břehu,  $Q$  je odhadovaný průtok ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $B$  je průměrná šířka toku (m). Bell (1969) uvádí jako možnou alternativu zjištění dostatečné vzdálenosti promísení vizuální pozorování rozptylu barevného stopovače.

Pokud je ke zjištění koncentrace stopovače NaCl v toku na místě používán konduktoměr, je nutné, aby před měřením proběhla kalibrace, která určí závislost koncentrace soli a naměřené konduktivity (Leibundgut a Seibert, 2011). Provádí se tak, že se známý objem vody z toku promísí se známým objemem roztoku soli o známé koncentraci (obvykle 10 g/l NaCl) a změří se konduktivita vzniklého roztoku. Toto se několikrát zopakuje s různým množstvím vody a/nebo solného roztoku a výsledné hodnoty se zanesou do grafu závislosti koncentrace a konduktivity (Zeman, 1999). Propojením výsledných hodnot vznikne kalibrační křivka; tento vztah je lineární či kvazilineární až do hodnoty 5,8 g/l NaCl (Juraschek, 2002; Leibundgut a



Seibert, 2011). Kalibrace by se měla provádět přímo v místě měření, konduktivita je totiž závislá na teplotě a případné pozdější kalibrování v jiných podmínkách může výsledky negativně ovlivnit (Boiten, 2005; Leibendgut a Seibert, 2011).

### 2.2.3 Princip měření

Pro měření průtoku chemickou metodou se využívají dva způsoby: metoda s jednorázovou injektáží a metoda s kontinuální injektáží stopovače. Jednorázová injektáž spočívá v jednorázovém vlití stopovače o známém množství do toku a pravidelném měření koncentrace stopovače (konduktivity) na dolním měrném profilu (Shaw, 1994). Měření pomocí kontinuální injektáže probíhá tak, že se do toku v místě injektáže po celou dobu měření vlévá stopovač o konstantním průtoku a koncentraci, přičemž na dolním měrném profilu dojde po určité době k ustálení koncentrace stopovače (Leibundgut a Seibert, 2011).

Množství soli potřebné k měření jednorázovou metodou závisí na velikosti průtoku, rychlosti proudění a požadované velikosti peaku koncentrace (Kilpatrick a Cobb, 1985). Leibundgut a Seibert (2011) uvádí, že množství injektované soli by mělo být takové, aby maximální naměřená konduktivita vzrostla alespoň o  $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  oproti pozad'ové konduktivitě, podle Juraschka (2002) je žádoucí dosáhnout peaku, který je alespoň o 20–30 % vyšší než pozad'ová konduktivita. Obecně se udává, že na průtok  $100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  by měl být použit 1 kg soli (Leibundgut a Seibert, 2011). V případě toku s vysokou pozad'ovou konduktivitou se ale musí přidat výrazně více stopovače, aby se dosáhlo požadované velikosti peaku (Kopáč, 2007).

Pokud se sůl dostatečně promíchala, nezáleží na poloze sondy konduktoměru v toku. Juraschek (2002) nicméně doporučuje neumisťovat sondu pod hloubku 0,2 ode dna. Sonda by se neměla umisťovat tam, kde je velké množství vzduchových bublin, protože kontakt bubliny se sondou způsobuje rušení měření (Kopáč, 2007). Při použití více sond je vhodné každou umístit na jiné místo v měrném profilu (Bruthans, 2006). Koncentrace se měří v celém průběhu průchodu stopovače měrným profilem (Leibundgut a Seibert, 2011). Průběh koncentrace stopovače v čase je znázorněn na obr. 10. Průtok lze poté vypočítat pomocí rovnice (Shaw, 1994; 22):

$$Q = \frac{Vc_1}{\int_{t_1}^{t_2} (c_2 - c_0) dt} \quad (22)$$

kde  $V$  je objem stopovače ( $\text{l}$ ),  $c_0$  je pozad'ová koncentrace stopovače v toku ( $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ),  $c_1$  je koncentrace stopovače při injektáži ( $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ),  $c_2$  je koncentrace stopovače na dolním měrném profilu ( $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a  $t$  značí čas ( $\text{s}$ ) prvního zaznamenání stopovače ( $\text{l}$ ) a čas návratu na pozad'ovou

hodnotu (2). Místo čitatele  $V_{c1}$  lze použít hmotnost stopovače  $m$  (g) (Leibundgut a Seibert, 2011).



Obr. 10. Znáornění průběhu koncentrace stopovače v čase u jednorázové a kontinuální injekece (upraveno dle Bell, 1969)

Pro kontinuální injekece soli je třeba použít zařízení schopné dodávat do toku stopovač o konstantním průtoku, tedy Mariottovu láhev nebo čerpadlo (Boiten, 2005). Kříž et al. (1988) uvádí, že spotřeba stopovače je u této metody mnohem vyšší než u jednorázové injekece, Boiten (2005) uvádí použití 4–8 kg soli na 25 l vody. Poloha sondy konduktoměru se řídí stejnými pravidly jako u jednorázové injekece. K měření koncentrace soli dochází po jejím ustálení (Leibundgut a Seibert, 2011). Průběh koncentrace v čase ukazuje obr. 10. Průtok se dopočítá použitím rovnice (Boiten, 2005; 23):

$$Q = q \frac{c_1 - c_2}{c_2 - c_0} \quad (23)$$

kde  $q$  je průtok injektovaného stopovače ( $l \cdot s^{-1}$ ).

Jednorázová injekece je nenáročná na vybavení, koncentrace stopovače se ale musí měřit po celou dobu jeho průchodu. Konstantní injekece má jednodušší výpočet a k měření koncentrace dochází jen po ustálení, ale vyžaduje speciální zařízení (Leibundgut a Seider, 2011). Zároveň není u konstantní injekece dopředu jasné, kdy už došlo k ustálení a kdy se dá měřit, na rozdíl od jednorázové injekece, u které se měří do opětovného dosažení požadované koncentrace (Kopáč, 2007).

Měření průtoku solí je vhodné provádět na malých turbulentních tocích s velkými sklony hladin a vysokými rychlostmi proudění, kde je obtížné či nemožné měřit pomocí rychlostních metod (Shaw, 1994; Boiten, 2005). Lze měřit i na větších tocích, kdy se sůl nerozmíchává ve vodě, ale sype se přímo do toku s předpokladem, že se v dostatečně turbulentním proudění rozpustí (J. Jiráček<sup>1</sup>, úst. sdělení). Častým zdrojem nepřesností jsou nedostatečná vzdálenost promísení, neúplné rozmíchání soli, adsorpce iontů na sediment nebo nepřesná kalibrace (Bell, 1969; Tazioli, 2011). John (1978) uvádí při bezchybném měření přesnost 1–2 %, Day (1976) udává chybu obvykle 4–7 % a maximálně 20 %, dle Bruthanse (2006) se přesnosti měření pohybují kolem 10 %.

Výhodou měření průtoku solí je přesné měření tam, kde je většina ostatních metod nepoužitelná. Vybavení je obzvláště u jednorázové metody lehce přenosné, celé měření bez problému zvládne jeden pracovník a lze měřit i v odlehlých oblastech (Bell, 1969; Shaw, 1994). K výpočtu není třeba měřit průtočnou plochu (John, 1978). Nevýhodou této metody je nemožnost měřit velké toky kvůli obrovskému množství soli, které by bylo potřeba (Gees, 1990). Rozmíchávání i relativně malého množství soli (jednotky kg) za použití kbelíků bývá zdlouhavé a obtížné.

## 2.3 Objemová metoda

Objemová metoda, známá také jako metoda měření průtoku pomocí kalibrované nádoby, představuje přímý způsob měření průtoků. Princip spočívá v měření času, za který se naplní nádoba o známém objemu vodou z toku (Kemel a Kolář, 1980). Jedná se o metodu velmi jednoduchou, protože ke změření průtoku postačuje jeden krok ve formě naplnění nádoby bez nutnosti zjišťování charakteristik koryta (John, 1978). Pod tuto metodu spadá jak jednorázové měření do nádoby, tak nepřetržité měření pomocí přístroje se sklopnými nádobami, případně výpočet průtoku řeky tekoucí z nádrže pomocí porovnání změny hladin v nádrži s hydrologickými bilančními prvky (Kemel a Kolář, 1980; Friederich a Smart, 1982). V této práci se budu detailněji zabývat pouze jednorázovým měřením.

### 2.3.1 Výběr nádoby

K měření průtoku se používají kalibrované nádoby různých materiálů a velikostí. Nejčastěji se využívají plastové nebo plechové nádoby, lze použít i nádobu skleněnou. Skleněné nádoby mají tu výhodu, že se nemusí opakovaně kalibrovat, ostatní nádoby je doporučeno kalibrovat

---

<sup>1</sup> Jan Jiráček, ČHMÚ - OAH Jablonec nad Nisou, jan.jirak@chmi.cz

minimálně jednou za 5 let (Kříž et al., 1988; Český metrologický institut, 2018). Jak velkou nádobu k měření použít, závisí na odhadu velikosti průtoku. Kříž et al. (1988) považuje nádobu za dostatečně velkou úměrně průtoku, pokud je doba napouštění alespoň 7 s. Český metrologický institut (2018) doporučuje při výběru nádoby postupovat podle tabulky 3.

*Tabulka 3. Doporučené objemy nádob k použití při různých velikostech průtoku (upraveno dle Českého metrologického institutu, 2018)*

| Objem nádoby (l) | Maximální hodnota průtoku (l.s <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--|
| 9                | 2,2  |
| 15               | 2,5  |
| 30               | 3,5  |
| 50               | 6,0  |

### 2.3.2 Výběr měrného profilu

Měření nádobou je vhodné pro toky s malým průtokem (Shope et al., 2013). Je ale možné měřit i větší průtoky v případě, že se profil toku rozdělí na několik proudů, jež se změří samostatně a jejichž průtok se nakonec sečte (Kemel a Kolář, 1980). Aby bylo možné měření provést, je potřeba najít vhodné místo v toku, případně tok před měřením upravit. Vhodné místo k měření představují přirozené schody v korytě tvořící vodopád (John, 1978), dobře využitelné jsou i různé v toku instalované přelivy. Přelivy mohou být trvalé nebo dočasné, vsazené do toku jen za účelem měření (Kříž et al., 1988; Shope et al., 2013).

### 2.3.3 Postup měření

Před začátkem měření se smočí povrch měrné nádoby. K měření jsou potřeba dva pracovníci: jeden do nádoby zachytává vodu a hlásí začátek a konec měření, druhý pomocí stopek odměřuje čas. Měření lze provést dvěma způsoby – buď se měří čas potřebný k úplnému naplnění nádoby, nebo se měří čas částečného naplnění. Druhý způsob je vhodné využít zejména v případě, že při dopadu vody do nádoby dochází k výraznému provzdušnění (Český metrologický institut, 2018). Měření na jednom měrném profilu se minimálně 3× zopakuje a z měření se vypočítá aritmetický průměr; toto není nutné, pokud měření trvá déle než 50 s (Kříž et al., 1988). Průtok se následně vypočítá ze vzorce (Kříž et al., 1988; 24)

$$Q = \frac{V}{t} \quad (24)$$

kde  $V$  je objem vody v nádobě (l) a  $t$  je průměrný naměřený čas (s).

Měření průtoku nádobou se hodí na malých tocích se stabilními podmínkami proudění. Na přesnost měření má vliv chyba nádoby a stopek, rychlost pracovníků a velikost průtoku. S rostoucím průtokem roste nepřesnost měření (Kříž et al., 1988; Shope et al., 2013). John (1978) považuje měření kalibrovanou nádobou za nejpřesnější způsob měření průtoku, přičemž dle Kříže et al. (1988) nepřesahuje chyba měření 1 %.

Výhodou této metody je rychlé, levné a přesné měření průtoku, které zvládne i nezkušený pracovník (Dobriyal et al., 2017). Nevýhodou je skutečnost, že lze pohodlně měřit jen velmi malé průtoky.

## 2.4 Metoda výpočtu průtoku ze známého průběhu hladiny

Tato metoda patří mezi nepřímé metody měření a výpočtu průtoku. Je založena na použití empirických vzorců k výpočtu střední profilové rychlosti pomocí veličin popisujících vlastnosti koryta a proudění, jako jsou hydraulický poloměr, sklon toku a koeficient drsnosti koryta. Rovnice, které se k výpočtu využívají, popisují ustálené proudění v otevřených korytech (Jarrett, 1986). Vhodný měrný úsek toku by měl být přímý, s konstantním sklonem hladiny a s uniformním korytem bez překážek a zpětného proudění. Tyto podmínky by měly zajistit přítomnost ustáleného proudění, na kterém závisí použitelnost empirických vzorců (Kemel a Kolář, 1980; Boiten, 2005). Přírodní toky obvykle nespĺňují kritéria pro ustálené proudění, ale volbou vhodného měrného úseku se lze těmto podmínkám přiblížit (Muste et al. 2019). V této kapitole nejprve představím rovnice pro výpočet průtoku ze známého průběhu hladiny a poté charakteristiku a výpočet jejich členů.

K výpočtu střední profilové rychlosti  $v_s$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se nejčastěji využívají Chézyho a Manningova rovnice. Chézyho rovnice (Chow, 1959; 25) má tvar:

$$v_s = c\sqrt{RI} \quad (25)$$

kde  $c$  je Chézyho rychlostní součinitel ( $\text{m}^{0.5}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $R$  je hydraulický poloměr (m) a  $I$  je podélný sklon hladiny (bezroz.). Manningova rovnice (Boiten, 2005; 26) je ve tvaru:

$$v_s = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

kde  $n$  je Manningův koeficient drsnosti ( $m^{-0,33} \cdot s$ ). Z rovnic (25) a (26) se následně vynásobením střední profilové rychlosti  $v_s$  průtočnou plochou  $S$  získá průtok  $Q$  (Shaw, 1994).

#### 2.4.1 Hydraulický poloměr

Hydraulický poloměr  $R$  se vypočítá jako poměr průtočné plochy  $S$  ku omočenému obvodu průtočného profilu  $O$  (m). Průtočná plocha se zjistí sondováním hloubek na průtočném profilu a výpočtem plochy po vynesení do grafu. Omočený obvod lze určit např. z nákresu profilu pomocí odpichovátka (Kemel a Kolář, 1980). Boiten (2005) uvádí, že se ke zjištění  $S$  a  $O$  měří minimálně na třech průtočných profilech (začátek, střed a konec měřného úseku), a jejich průměrné hodnoty se následně vypočítají ze vzorce (Boiten, 2005; 27):

$$S = \frac{S_z + 2S_s + S_k}{4} \quad (27)$$

kde dolní indexy  $z$ ,  $s$  a  $k$  značí měření na začátečním, středovém a koncovém profilu. Analogicky se postupuje při výpočtu průměrného omočeného obvodu (Boiten, 2005).

#### 2.4.2 Sklon hladiny

Sklon hladiny  $I$  (bezrozm.) se získá z rovnice (Kemel a Kolář, 1980; 28):

$$I = \frac{\Delta h}{L} \quad (28)$$

kde  $\Delta h$  je rozdíl nadmořských výšek hladin dvou profilů (m) od sebe vzdálených  $L$ . Riggs (1976) považuje vzdálenost  $L$  za dostatečnou, pokud je 4–5× delší než šířka toku, Kemel a Kolář (1980) ovšem navrhují pracovat s  $L$  alespoň 6–10× delší než šířka toku. Boiten (2005) doporučuje za minimální vzdálenost kromě pětinasobku šířky toku také 75× průměrnou hloubku toku, přičemž minimální spád by měl být nejméně 15 cm. U měření povodňových průtoků lze sklon vypočítat i zpětně pomocí zaměření povodňových značek (Jarrett, 1986).

#### 2.4.3 Manningův koeficient drsnosti

Manningův koeficient drsnosti  $n$  představuje celkový odpor pozorovaného úseku proti proudění vody (Kemel a Kolář, 1980). Je funkcí materiálu dna, útvarů na dně (čeřiny), nepravidelností břehů, hloubky a sklonu toku a je také sezónně ovlivněn přítomností vegetace. Určování hodnoty  $n$  bývá obvykle obtížné a velmi závisí na zkušenostech hydrologa provádějícího měření (Boiten, 2005; Muste et al., 2019). K odhadu koeficientu drsnosti se často využívá závislost  $n$  na zrnitosti materiálu dna, příkladem je tabulka 4.

Tabulka 4. Tabulka koeficientu drsnosti  $n$  v závislosti na velikosti materiálu dna – upraveno dle Mattase (2014) a Coona (1998)

| Materiál      | Hrubý písek    | Jemný štěrka | Štěrk          | Hrubý štěrka | Velmi hrubý štěrka | Malé oblázky | Oblázky        | Balvany        |
|---------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|
| Velikost (mm) | 1–2            | 4–8          | 2–64           | 16–32        | 32–64              | 64–128       | 64–256         | >256           |
| $n$           | 0,026 až 0,035 | 0,024        | 0,028 až 0,035 | 0,028        | 0,032              | 0,036        | 0,030 až 0,050 | 0,040 až 0,070 |

Další možností zjištění  $n$  je výpočet pomocí některého ze vzorců, příkladem je rovnice (Jarrett, 1986; 29), ve které je  $n$  funkcí sklonu a hydraulického poloměru:

$$n = 0,39I^{0,38}R^{-0,16} \quad (29)$$

Tuto rovnici lze použít u přírodních toků se stabilním dnem tvořeným hrubozrnným materiálem, s minimem vegetace a překážek proudění (Jarrett, 1986), jejichž sklon je mezi 0,002–0,03 a hydraulický poloměr mezi 0,5–2 m (Boiten, 2005).

#### 2.4.4 Chézyho rychlostní součinitel

Chézyho rychlostní součinitel  $c$  je veličina, která v sobě vyjadřuje hydraulické odpory koryta, jako jsou odpory související s tvarem nebo propustností koryta. Závisí na drsnosti koryta a hydraulickém poloměru, a celá řada autorů přišla s rovnicemi sloužícími k jeho výpočtu (Mattas, 2014). Příkladem výpočtu rychlostního součinitele jsou mocninné vzorce ve tvaru (ČSN ISO 1070, 1994; 30):

$$c = \frac{1}{n} R^y \quad (30)$$

Různí autoři pracují s rozdílnými exponenty  $y$ : Manning uvádí  $y = 1/6$  (Chow, 1959), Forchheimer  $y = 1/5$  (Mattas, 2014), jiní autoři uvádí proměnlivá  $y$  v závislosti na koeficientu drsnosti (Kemel a Kolář, 1980). Podle Mattase (2014) jsou pro hydraulické poloměry větší než 0,5 m rozdíly vypočteného  $c$  přijatelné až na Manningův vzorec, který při  $R > 2,5$  m výrazně podhodnocuje rychlostní součinitel.

K výpočtu  $c$  se využívají i logaritmické rovnice, velmi známý je Agroskinův vzorec (Kemel a Kolář, 1980; 31):

$$c = 17,72(\log R + k_A) \quad (31)$$

kde  $k_A = 0,05643/n$ . Kemel a Kolář (1980) uvádí jako další z vhodných rovnic Martincův vzorec, který vychází z Agroskina a je upraven podle měření na místních tocích, Mattas (2014) ovšem Martincův vzorec v konkurenci jiných logaritmických vzorců vyřazuje jako poskytující příliš odlehle výsledky.

Metoda výpočtu průtoku ze známého průběhu hladin se používá u zpětných výpočtů povodňových průtoků a k protažení měrné křivky průtoků (Shaw, 1994), lze ji využít i k měření průtoku pod zamrzlou hladinou (Beltaos, 2011). Zdrojem nepřesností jsou výpočty průtočné plochy a omočeného obvodu, měření sklonu hladiny nebo špatný odhad koeficientu drsnosti (ČSN ISO 1070, 1994). Přesnost této metody se dle Muste et al. (2019) pohybuje mezi 8–16 %, dle Jarretta (1986) i kolem 25 %. Norma ČSN ISO 8363 (1993) uvádí minimální chybu metody 10 %.

Výhodou metody je výpočet průtoků v případech, kdy ho nelze zjistit jinými přesnějšími metodami (Boiten, 2005). Praktický je i výpočet již prošlé povodně (Jarrett, 1986). Nevýhodou metody je její nižší přesnost a potřeba zkušeného pracovníka (Shaw, 1994; Boiten, 2005). Zároveň se jedná o metodu časově náročnou (ČSN ISO 8363, 1993).

## 2.5 Metody zúžení toku

Metody zúžení toku se využívají ke kontinuálnímu měření průtoku, dochází při nich k nepřímému měření hladiny nad zúžením a výpočtu průtoku pomocí vhodného vzorce (Boiten, 2005; Hlom a Balvín, 2019). Princip je založen na vyvolání kritického proudění, pro které existuje jedinečný vztah mezi výškou hladiny a průtokem (Shaw, 1994). Kritické proudění nastává v místě zúžení toku, kdy dochází k přechodu z říčního (podkritického) proudění na proudění bystřinné (nadkritické) (Mattas, 2014). Nadkritické proudění nastává, když je rychlost proudění větší než kritická a malé vzruchy již nepostupují proti proudu; je charakterizováno Froudeho číslem větším než 1, přičemž podkritické proudění nastává za Froudeho čísla menšího 1 a kritické při Froudeho číslu rovno 1 (ČSN EN ISO 772, 2012).

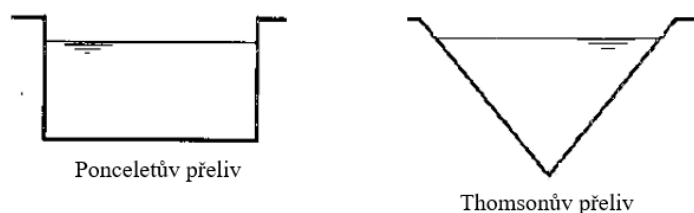
Zúžení toku je prováděno budováním umělých konstrukcí v podobě měrných přelivů a žlabů (Shaw, 1994). Přelivy mají podobu prahu nebo stěny s výřezem (PARS aqua, 2021), žlaby se



vytváří zmenšením profilu (zúžením toku, případně i zvýšením dna) (Kříž et al., 1988). Výběr správného prostředku k upravení toku je závislý na rozpětí měřeného průtoku, množství unášeného sedimentu, přesnosti i potřebě plnění jiných funkcí, než je jen měření průtoku (např. regulace průtoku) (Boiten, 2005). Společnou vlastností všech konstrukcí určených k měření průtoku metodou zúžení je nutnost zajistit, aby nedocházelo k obtékání přelivu či žlabu dnem ani břehy (Kříž et al., 1988).

### 2.5.1 Měrné přelivy

Měrné přelivy se dělí na ostrohranné a na přelivy s korunou. Ostrohranné přelivy (obr. 11) jsou konstrukce přehrazující tok tenkým plátem s výřezem, umožňující kontrolovaný přetok vody. Přelivy s korunou se konstruují vestavěním různě dlouhého prahu do toku (PARS aqua, 2021). Nejčastěji stavěné ostrohranné přelivy jsou Thomsonův s trojúhelníkovým výřezem s úhlem 90° a Ponceletův s obdélníkovým výřezem (Kříž et al., 1988), které jsou detailně popsány v následujících odstavcích. Existují i jiné ostrohranné přelivy, například přeliv s lichoběžníkovým výřezem (Cipolettiho) či přeliv s kruhovým výřezem (Boiten, 2005).



Obr. 11. Znárodnění výřezu Thomsonova a Ponceletova přelivu (upraveno dle Boitena, 2005)

Rovnice sloužící k výpočtu průtoku  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) má pro Thomsonův přeliv tvar (Hlom a Balvín, 2019; 32):

$$Q = 1,4 \times h_p^{2,5} \quad (32)$$

kde  $h_p$  je přepadová výška hladiny ve výřezu (m). Na Ponceletově přelivu se průtok určí pomocí rovnice (Boiten, 2005; 33):

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h_p^{1,5} \quad (33)$$

kde  $b$  je šířka výřezu,  $g$  je gravitační zrychlení ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) a  $\mu$  je součinitel přepadu unikátní pro každý přeliv, který se při kalibraci přelivu zaměřuje hydrometrickou vrtulí (Kříž et al., 1988).

Thomsonův přeliv je vhodné konstruovat na tocích s velkým rozsahem měřených průtoků, Ponceletův přeliv má při nízkých průtocích nižší přesnost. Výhodou Ponceletova přelivu je menší vzduť proti proudu a také nižší hrozba zachycení naplavenin než u Thomsonova přelivu (Kemel a Kolář, 1980; Hlom a Balvín, 2019).

### 2.5.2 Měrné žlaby

Příklady měrných žlabů jsou Venturiho a Parshallův žlab. Venturiho žlab je předchůdcem Parshallova žlabu, který z něho vychází (Kilpatrick a Schneider, 1983). Průtok  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) se pomocí měření na Venturiho žlabu získá rovnicí (Kříž et al., 1988; 34):

$$Q = \varphi b_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (34)$$

kde  $\varphi$  je součinitel vyjadřující odpor proudění,  $h_1$  je hloubka vody před zúžením,  $h_2$  je hloubka vody v zúžení a  $b_2$  je šířka profilu v zúžení. Parshallův žlab (obr. 12) se od Venturiho žlabu liší především ostrým poklesem dna v místě zúžení (Kilpatrick a Schneider, 1983) a k výpočtu průtoku se používá rovnice (Shaw, 1994; 35):

$$Q = K b_2 h_2^{1,5} \quad (35)$$

kde  $K$  je součinitel jedinečný pro každý žlab. Výhodou Parshallova žlabu oproti žlabu Venturiho je zjednodušení měření, protože k měření a výpočtu průtoku pomocí Parshallova žlabu je potřeba jen jedno měření hloubky (Kilpatrick a Schneider, 1983; Kříž et al., 1988).



Obr. 12. Návrh konstrukce Parshallova žlabu (PARS aqua, 2021)

Metoda zúžení toku je obecně používána pro měření průtoku na malých tocích (Dobriyal et al., 2017) a jako obzvláště vhodná se jeví k použití na malých experimentálních povodích, kde je

třeba kontinuálně a co možná nejpřesněji měřit průtok (Kemel a Kolář, 1980). Na přesnost měření má vliv konstrukce opatření, správné zvolení součinitelů  $\mu$  a  $\varphi$  při kalibraci nebo měření výšky hladiny vody (John, 1978; Boiten, 2005). Kříž et al. (1988) uvádí u dobře postaveného přelivu přesnost do 1 %, v případě malých přepadových paprsků může chyba dosáhnout i 5 %. Správně postavené žlaby by měly mít přesnost 2–3 %. Boiten (2005) uvádí přesnost žlabů i přelivů do 5 %, přičemž za vůbec nejpřesnější považuje ostrohranné přelivy.

Hlavní výhodou metod zúžení toku je rychlé, přesné a kontinuální měření průtoků (ČSN ISO 8363, 1993; Boiten, 2005). Nevýhodami jsou hrozba zasedimentování konstrukcí a zachytávání naplavenin (Kříž et al., 1988), v případě ostrohranných přelivů dochází k přerušení migračních tras vodních organismů. Konstrukce měrných přelivů a žlabů požaduje obvykle výraznou úpravu profilu a je drahá (John, 1978).

## 2.6 Měrná křivka průtoků

Měrná křivka průtoků (dále jen měrná křivka), známá také jako konzumní křivka, představuje vztah mezi vodním stavem a průtokem, díky kterému lze podle výšky hladiny vody v toku přibližně určit velikost průtoku (Kemel a Kolář, 1980). Jedná se o jeden z často využívaných a výhodných způsobů určování průtoků, zejména v případě kontinuálních měření (Boiten, 2005; Braca, 2008). K použití měrné křivky je třeba určit vodní stav. Způsoby jeho měření představím v následující podkapitole.

### 2.6.1 Vodní stav

Vodní stav je výška hladiny toku nad stanoveným pevným bodem. Pokud se měří na vodních dílech, vztahuje se obecně ke střední hladině moře, a udává se v m n. m. V případě měření na vodních tocích bývá pevný bod stanoven pod nejnižší očekávanou hladinu průtoků, a vodní stav se uvádí v cm. Pevný bod by měl být přesně geodeticky zaměřen podle souřadnicového systému používaného v dané zemi (Kříž et al., 1988; Shaw, 1994).

Vodní stav lze měřit pravidelným pozorováním vodoměrných latí nebo automatickým zaznamenáváním pomocí limnigrafů. Vodoměrná lať, známá také jako vodočet, je vyrobena z odolného materiálu a obvykle rozdělena po 2 cm. Umisťuje se svisle na piloty, mostní pilíře nebo zdi umělých kanálů, či šikmo na břeh (Kemel a Kolář, 1980; Kříž et al., 1988). Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější prostředek k měření vodního stavu, nevýhodou je nutnost přítomnosti pozorovatele (Boiten, 2005).

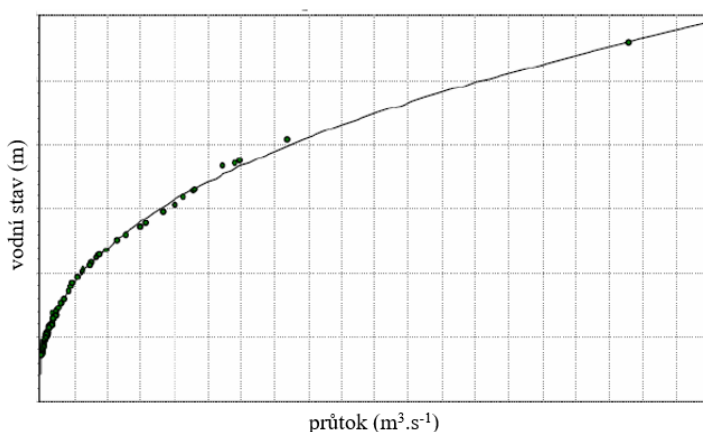
Ke kontinuálnímu měření slouží plovákové, tlakové a akustické limnigrafy. Plovákové limnigrafy měří pomocí plováku výšku hladiny v plovákové komoře propojené s tokem, tlakové limnigrafy měří hydrostatický tlak a převádí ho na vodní stav, a akustické limnigrafy využívají odraz vyslaného zvukového signálu od hladiny (Shaw, 1994). K zaznamenávání vodního stavu mohou sloužit papírové válce, magnetické a děrné pásy nebo paměťové karty, s rozvojem techniky je populární přenos dat v reálném čase pomocí telefonu (Boiten, 2005).

### 2.6.2 Tvorba měrné křivky

K vytvoření měrné křivky je třeba na vybraném profilu udělat několik měření vodního stavu a na něj navázaného průtoku (Harrelson et al., 1994). Vodní stav se měří pomocí přítomného zařízení a k měření průtoku se vybere jedna z běžně používaných, nejčastěji rychlostních metod (Boiten, 2005). Je žádoucí, aby se při tvorbě měrné křivky provedla měření na co největším rozpětí vodních stavů a průtoků (Schmidt a Yen, 2001). Výsledná měrná křivka má zpravidla podobu parabolického grafu (obr. 13), lze ji vyjádřit i pomocí rovnice, která má obecný tvar (Kemel a Kolář, 1980; 36):

$$Q = a(b + H)^m \quad (36)$$

kde  $a$ ,  $b$  a  $m$  jsou konstanty a  $H$  je vodní stav. Měrná křivka může mít také podobu tabulky (Braca, 2008).



Obr. 13. Znárodnění grafu měrné křivky (upraveno dle Bracy, 2008)

Tvar měrné křivky je funkcí geometrie profilu (Boiten, 2005). Závislost mezi vodním stavem a průtokem není v čase stálá, a pokud dojde ke změně tvaru profilu, měrná křivka přestává platit. Problém představují změny tvaru koryta, sezónní změny množství vegetace nebo tvorba ledu (Kemel a Kolář, 1980; Kříž et al., 1988). U některých řek je vhodné konstruovat několik

měrných křivek vztahujících se na různá roční či vegetační období. Platnost měrné křivky je třeba pravidelně kontrolovat, a to alespoň 10× ročně (Shaw, 1994; Schmidt a Yen, 2001).

Průtok je kromě vodního stavu závislý i na sklonu toku (Schmidt a Yen, 2001). Při povodňových průtocích, kdy je v čele povodňové vlny větší sklon než na její patě, dochází k jevu, který se nazývá hystereze měrné křivky. Vyznačuje se tím, že měrná křivka má při stoupání průtoku a vodního stavu jiný průběh než při jejich klesání (Braca, 2008). To má za následek, že ačkoli bylo při kulminaci povodně dosaženo nejvyššího vodního stavu, maximálního průtoku bylo dosaženo ještě dříve (Kemel a Kolář, 1980).

Měrná křivka průtoků se hodí ke kontinuálnímu měření průtoku (Boiten, 2005), na většině vodoměrných stanic pod správou ČHMÚ dochází k vyhodnocování průtoku na základě měření vodního stavu právě pomocí měrné křivky (ČHMÚ, 2021). Přesnost měrné křivky závisí na správném určení vztahu mezi průtokem a vodním stavem, na podmínkách koryta a proudění při měření či na přesnosti měření vodního stavu. Výrazným zdrojem nepřesností jsou i extrapolace měrné křivky mimo původně naměřené hodnoty průtoků a vodních stavů (Braca, 2008). Kennedy (1984) uvádí, že chyba měrné křivky za běžných průtoků nejčastěji nepřesahuje 5 %, při povodňových stavech může ovšem chyba vystoupat až na 15 %. Obecně platí, že čím více měření se při tvorbě měrné křivky provede, tím přesnější výsledná křivka bude (Harrelson et al., 1994).

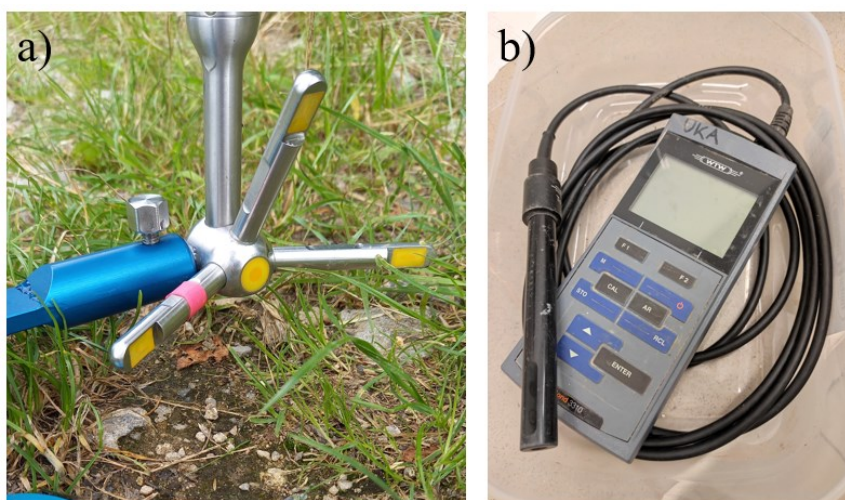
Výhodou použití měrné křivky při určování průtoku je možnost automatického měření bez nutnosti přítomnosti pozorovatele, což je výhodné zejména při pozorování a vyhodnocování povodňových situací (Braca, 2008). Nevýhodou měrné křivky představuje skutečnost, že pokud dojde (např. v důsledku průchodu povodňové vlny) k přetvoření koryta v místě měření, přestane měrná křivka pro daný profil platit (Shaw, 1994). Stanovení měrné křivky a její pravidelné ověřování je časově náročné a nákladné (Schmidt a Yen, 2001).

### 3. Terénní práce – popis měření

V rámci praktické části práce jsem se zaměřila na vybrané jednorázové metody měření průtoku, jmenovitě na hydrometrickou vrtuli, FlowTracker, plovákovou metodu a chemickou metodu. Na tocích Botič, Žehrovka a Libuňka, v místě jejich osazení vodoměrnými stanicemi ČHMÚ, jsem provedla měření všemi nebo některými z uvedených metod s úmyslem porovnat výsledné hodnoty průtoků mezi sebou a s průtoky uváděnými ČHMÚ. Toky mi byly doporučeny konzultantem práce M. Šobrem a pracovníkem ČHMÚ J. Jirákem. V následujících odstavcích

podrobně popisují jednotlivá měření z hlediska použitých metod a stručně charakterizují měrné úseky toků.

K měření hydrometrickou vrtulí jsem použila přístroj Ott C2 od firmy Ott HydroMet s propelerem velikosti 5 (obr. 1). Vrtule byla kalibrována v roce 2020 na VÚV, kalibrační rovnice má pro  $0,41 \leq n \leq 5,72$  tvar  $v = 0,0360 + 0,0570n$  a pro  $5,72 \leq n \leq 26,95$  tvar  $v = 0,0543 + 0,0538n$ . Přesnost přístroje uváděná výrobcem je  $\pm 2 \%$  (HYDROMETRICS, 2017). Vrtule byla připevněna k soutyčí. K měření pomocí FlowTrackeru jsem použila přístroje FlowTracker Handheld ADV s 2D sondou (dále FlowTracker 2D), FlowTracker2 Handheld ADV s 2D sondou (dále FlowTracker2 2D) a FlowTracker2 Handheld ADV s 2D/3D sondou (dále FlowTracker2 3D; obr. 14a) od firmy SonTek. Dle výrobce je rozlišení měření rychlosti  $0,0001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , rozsah měření rychlosti  $0,001\text{--}4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a přesnost měřených rychlostí  $\pm 1 \%$  (SonTek, 2019). K měření chemickou metodou jsem jako stopovač použila kuchyňskou sůl NaCl a k měření konduktivity dva konduktoměry WTW Cond 3310 (obr. 14b) se sondou Tetracon 325 o udávaném rozsahu  $0.0 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}\text{--}2 \text{ S}/\text{cm}$ , rozlišení  $0,1 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$  až  $10 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$  (dle měřené hodnoty) a přesností  $0,5 \%$  z měřené hodnoty (WTW GmbH, 2009). Při měření plovákovou metodou jsem jako hladinový plovák použila dřevěnou destičku.



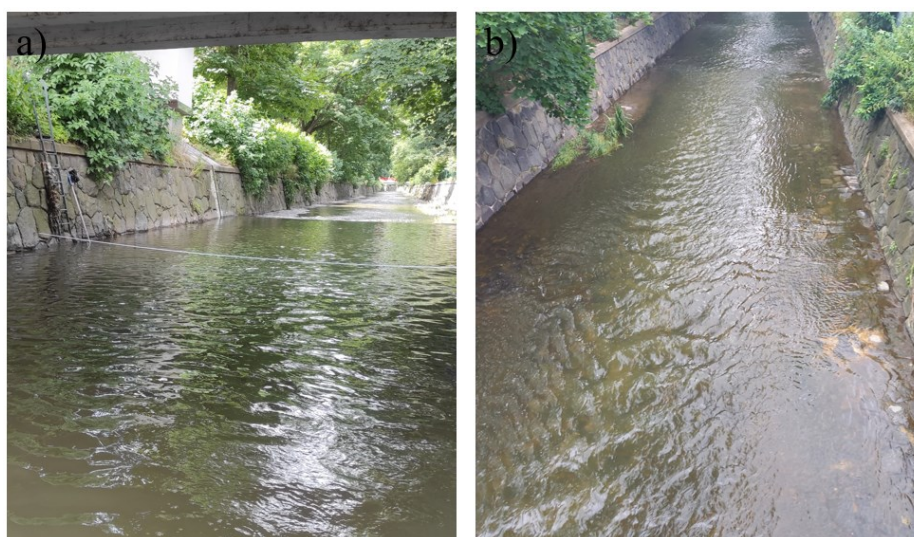
Obr. 14. Přístroje využitě k měření průtoku: a) 2D/3D sonda FlowTrackeru2, b) konduktoměr WTW Cond 3310 (foto M. Slavík)

Při vyhodnocování průtoku měřeného hydrometrickou vrtulí jsem použila středovou metodu, popsanou rovnicemi (8, 9) v kapitole 2.1.1. Přístroje FlowTracker vyhodnocují průtok automaticky na konci měření, zvolenou metodou byla také středová metoda. Měření plovákovou metodou jsem u toku Žehrovka (Březina) vyhodnotila pomocí středové metody, u toku Libuňka (Sedmihorky) jsem průtok počítala z maximálních povrchových rychlostí pomocí

rovnice (16) popsané v kapitole 2.1.2. K vypočítání průtoku chemickou metodou jsem použila program prutok.xls, který vytvořili Ondřej Zeman a Jiří Bruthans. Princip výpočtu je založen na míře rozředění známého množství stopovače a následného výpočtu průtoku pomocí rovnice (22) popsané v kapitole 2.2.3. Výpočty provedené programem prutok.xls jsem ověřovala vlastním výpočtem.

### 3.1 Botič (Praha – Nusle)

Dne 30.6.2021 jsem ve spolupráci se svým školitelem a konzultantem provedla měření na toku Botič (číslo hydrologického pořadí 1-12-01-0201) u vodoměrné stanice Praha – Nusle, a to hydrometrickou vrtulí, FlowTrackerem 2D, FlowTrackerem2 3D a chemickou metodou. Vodoměrná stanice se nachází u parku Folimanka pod Nuselským mostem, na staničení 1,3 km (povodí Vltavy) a na souřadnicích 50.0664308 s.š. a 14.4300502 v.d. Dno a břehy toku jsou vydlážděny hrubě opracovaným kamenem, u vodoměrné stanice bylo proudění spíše laminárního charakteru (obr. 15a) a pod vodoměrnou stanicí bylo proudění více turbulentní (obr. 15b). Během měření klesal vodní stav, a to z 60 cm ( $0,803 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) až na 56 cm ( $0,535 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



Obr. 15. Měření na Botiči 30.6.2021: a) měrný profil pro měření vrtulí a FlowTrackery (foto M. Slavík), b) úsek pro měření chemickou metodou

Hydrometrickou vrtulí a FlowTrackery jsem měřila přibližně 5 m nad vodoměrnou stanicí, kde se proudění jeví jako laminární. Měrný profil byl široký 8,45 m a maximální hloubka byla 0,45 m. Měřila jsem jedno- až třibodovou metodou (v závislosti na hloubce toku, viz rovnice 3–6) na 34 svislících, tak jak je v souladu s korektním měřením uvedeným v kapitole 2.1.1. Měření

FlowTrackerem 2D probíhalo za vodního stavu 57–58 cm ( $0,600\text{--}0,666\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), měření hydrometrickou vrtulí za vodního stavu 56–57 cm ( $0,535\text{--}0,600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) a měření FlowTrackerem2 3D za vodního stavu 56 cm ( $0,535\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Měření chemickou metodou probíhalo ve spíše turbulentním úseku pod vodoměrnou stanicí. Dle rovnice (20) byla určena minimální vzdálenost promísení 135 m. Místo injektáže bylo tedy umístěno přibližně 140 m nad měrným profilem. Jeden konduktoměr byl umístěn doprostřed profilu, druhý konduktoměr u levého břehu. Za vodního stavu 60 cm ( $0,803\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) bylo injektováno 5 kg soli, za vodního stavu 59 cm ( $0,734\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) 7 kg soli a za vodního stavu 58 cm ( $0,666\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) 9 kg soli. Během celého měření výrazně klesala hodnota pozad'ové konduktivity.

### 3.2 Žehrovka (Březina)

Dne 8.7.2021 jsem ve spolupráci se školitelem a J. Jirákem provedla měření na toku Žehrovka (číslo hydrologického pořadí 1-05-02-0300) u vodoměrné stanice Březina, a to hydrometrickou vrtulí, FlowTrackerem2 2D, FlowTrackerem2 3D, plovákem a chemickou metodou. Vodoměrná stanice se nachází pod rybníkem Žabakor, na staničení 0,5 km (povodí Jizery) a na souřadnicích 50.5489537 s.š. a 15.0423823 v.d. Během celého měření byl setrvalý vodní stav 37 cm ( $0,130\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dno toku bylo převážně jílovito-písčité s občasnými balvany, v toku nad vodoměrnou stanicí se proudění jeví jako laminární (obr. 16a) a pod vodoměrnou stanicí se nacházel krátký úsek turbulentního proudění (obr. 16b).



Obr. 16. Měření na Žehrovce 8.7.2021: a) měření plovákovou metodou na laminárním úseku toku (foto M. Slavík), b) úsek toku použitý pro měření chemickou metodou



Měření pomocí hydrometrické vrtule a FlowTrackerů 2D a 3D probíhalo u vodoměrné stanice, kde je do toku zabudovaný betonový práh (doporučeno J. Jirákem) a proudění má laminární charakter. Tok byl v místě měření široký 4 m a maximální hloubka dosahovala 0,19 m. Ve všech případech se měřilo jednobodovou metodou na 18 svislicích při dodržení požadavků z kapitoly 2.1.1.

Měření plovákem v podobě dřevěné destičky jsem provedla 40 m nad vodoměrnou stanicí, protože se zde nacházel vhodný dostatečně dlouhý úsek s prouděním laminárního charakteru. Tok byl široký 4 m a maximální hloubka dosahovala 0,34 m. Měření jsem provedla na přímém měrném úseku dlouhém 8 m, označeném 3 nataženými měrnými pásmy. Plovák jsem vypouštěla 5 m nad měrným úsekem, a měřila jsem ve 3 drahách, v každé dráze 2×. Měření hloubek a vzdáleností plováků od břehu jsem provedla v polovině měrného úseku. Hodnotu korekčního koeficientu jsem určila jako 0,86 dle tabulky 2 uvedené v kapitole 2.1.2.

Měření pomocí chemické metody jsem provedla pod vodoměrnou stanicí, kde byl úsek s turbulentním prouděním. Dle rovnice (20) by měla být minimální vzdálenost mezi místem injektáže a měrným profilem 75,5 m, ale protože příhodné podmínky proudění pro chemickou metodu (turbulentní proudění bez oblastí s velmi pomalým prouděním, kde by hrozilo výrazné zdržení stopovače; Kopáč, 2007) byly jen na kratším úseku, umístila jsem konduktoměry do vzdálenosti přibližně 60 m od místa injektáže. Konduktoměry byly umístěny zhruba ve třetinách šířky profilu. Provedla jsem celkově 3 měření, během nichž bylo do toku injektováno 3× 3 kg soli. Během celého měření docházelo ke kolísání hodnoty pozad'ové konduktivity.

### 3.3 Libuňka (Sedmihorky)

Dne 8.7.2021 jsem společně se školitelem provedla měření na toku Libuňka (číslo hydrologického 1-05-02-0180-0-00-20) u vodoměrné stanice Sedmihorky, a to hydrometrickou vrtulí, FlowTrackerem 2 3D, plovákem a chemickou metodou. Vodoměrná stanice se nachází u silnice lemované lipovou alejí vedoucí do kempu Sedmihorky, na staničení 4,7 km (povodí Jizery) a na souřadnicích 50.5581139 s.š. a 15.1955118 v.d. Během celého měření byl setrvalý vodní stav 55 cm ( $0,185 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Dno toku bylo tvořeno jílovito-písčitými sedimenty s občasnými balvany, nad vodoměrnou stanicí mělo proudění laminární charakter (obr. 17a) a pod vodoměrnou stanicí bylo proudění turbulentní (obr. 17b).



Obr. 17. Měření na Libuňce 8.7.2021: a) laminární úsek toku použitý pro měření vrtulí, FlowTrackerem a plovákem, b) turbulentní úsek toku, na kterém proběhlo měření chemickou metodou (foto M. Slavík)

Hydrometrickou vrtulí a FlowTrackerem2 3D jsem měřila u vodoměrné stanice, měrný profil byl široký 4,8 m s maximální hloubkou 0,53 m. Měřila jsem jedno- až třibodovou metodou (v závislosti na hloubce, viz rovnice 3–6) na 16 (vrtule) a 19 (FlowTracker) svislicích při dodržení požadavků z kapitoly 2.1.1.

Měření plovákovou metodou (pomocí dřevěné destičky) proběhlo nad vodoměrnou stanicí pod silničním mostem, kde bylo přímé pravidelné vydlážděné koryto. Tok byl široký 4,5 m a maximální hloubka dosahovala 0,53 m. Měrný úsek byl 9 m dlouhý, plovák jsem vypouštěla 5 m nad měrným úsekem. Provedla jsem měření maximálních povrchových rychlostí, protože se plovák z drah blízko břehu stácel doprostřed toku. Měřila jsem 3×. Měření hloubek a vzdáleností od břehu se uskutečnilo na konci měřeného úseku v rámci měření vrtulí. Korekční koeficient jsem dle Kemela a Koláře (1980) určila jako rozsah hodnot 0,55–0,67, což je uvedeno jako vhodné pro toky s příznivými podmínkami proudění se střední hloubkou do 1 m.

Měření chemickou metodou jsem provedla v turbulentním úseku pod vodoměrnou stanicí. Dle rovnice (20) by měla minimální vzdálenost promísení být 85,5 m, vhodné podmínky pro chemickou metodu však byly pouze na kratším úseku, umístila jsem proto konduktoměry do vzdálenosti přibližně 55 m od místa injektáže. Konduktoměry byly umístěny doprostřed toku. Celkově jsem provedla 3 měření, během nichž bylo injektováno 5, 7 a 7 kg soli. Během 1. injektáže mírně vzrostla pozad'ová konduktivita, během zbylých injektáží se již neměnila.

#### 4. Terénní práce – Výsledky měření

V této kapitole uvádím výsledné hodnoty průtoku na zvolených tocích získaných několika vybranými metodami a srovnávám je mezi sebou a s hodnotami z vodoměrných stanic ČHMÚ. Data, ze kterých při výpočtech vycházím, jsou přiložena v přílohách. Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami vyjadřuji pomocí tzv. relativní odchylky  $d_r$  (%) (Soupir et al., 2009, 37):

$$d_r = \frac{Q_n - Q_k}{Q_k} \times 100 \quad (37)$$

kde  $Q_n$  je naměřený průtok ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $Q_k$  je kontrolní průtok ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), v mém případě průtok z ČHMÚ.

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty průtoků dle ČHMÚ v době měření, hodnoty průtoků naměřené jednotlivými metodami a jejich relativní odchylky. Z důvodu nižšího rozlišení vodoměrných stanic (v případě stanice Praha – Nusle v řádu vyšších setin  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) uvádím při kolísání vodního stavu v průběhu měření rozsah relativních odchylek. Dále rozebírám měření v dílčích kapitolách věnovaných měřením na jednotlivých měrných profilech.

Tabulka 5. Naměřené hodnoty průtoků a jejich relativní odchylky od průtoků udávaných ČHMÚ. V případě chemické metody jsou použity průměry průtoků z obou konduktometrů.

Zkratka FT značí FlowTracker.

| Datum     | Místo měření             | Průtok dle ČHMÚ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Metoda měření | Změření průtoků ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Relativní odchylka $d_r$ (%) |
|-----------|--------------------------|--|---------------|--|------------------------------|
| 30.6.2021 | Botič<br>(Praha – Nusle) | 0,600–0,666  | FT 2D         | 0,639  | -4,1 až +6,5                 |
|           |                          | 0,535  | FT2 3D        | 0,538  | +0,6                         |
|           |                          | 0,535–0,600  | Vrtule        | 0,548  | -8,7 až +2,4                 |
|           |                          | 0,734  | 1. Sůl 5 kg   | -  | -                            |
|           |                          | 0,734  | 2. Sůl 7 kg   | -  | -                            |
|           |                          | 0,666  | 3. Sůl 9 kg   | 0,602  | -9,6                         |
| 8.7.2021  | Žehrovka<br>(Březina)    | 0,130  | FT2 2D        | 0,145  | +11,5                        |
|           |                          | 0,130  | FT2 3D        | 0,146  | +12,3                        |
|           |                          | 0,130  | Vrtule        | 0,148  | +13,8                        |
|           |                          | 0,130  | Plovák        | 0,144  | +10,8                        |
|           |                          | 0,130  | 1. Sůl 3 kg   | -  | -                            |
|           |                          | 0,130  | 2. Sůl 3 kg   | 0,141  | +8,5                         |
|           |                          | 0,130  | 3. Sůl 3 kg   | 0,157  | +20,8                        |
| 8.7.2021  | Libuňka<br>(Sedmihorky)  | 0,185  | FT2 3D        | 0,178  | -3,8                         |
|           |                          | 0,185  | Vrtule        | 0,176  | -4,9                         |
|           |                          | 0,185  | Plovák        | 0,178–0,218  | -3,8 až +17,8                |
|           |                          | 0,185  | 1. Sůl 5 kg   | 0,232  | +25,4                        |
|           |                          | 0,185  | 2. Sůl 7 kg   | 0,202  | +9,2                         |
|           |                          | 0,185  | 3. Sůl 7 kg   | 0,220  | +18,9                        |

#### 4.1. Botič (Praha – Nusle)

Měření pomocí hydrometrické vrtule probíhalo dle měrné stanice ČHMÚ za vodního stavu 0,535–0,600  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Mnou změřená hodnota činí 0,548  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , je tedy v rozsahu průtoků udávaném ČHMÚ a relativní odchylka se pohybuje od -8,7 do +2,4 %. Měření pomocí FlowTrackeru2 2D probíhalo dle ČHMÚ za vodního stavu 0,600–0,666  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , výsledek mého měření je 0,639  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy v rozsahu těchto hodnot a s relativní odchylkou -4,1 až +6,5 %.

Měření pomocí FlowTrackeru2 3D proběhlo dle ČHMÚ za vodního stavu  $0,535 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a mé měření vyšlo  $0,538 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy s relativní odchylkou pouhých  $+0,6 \%$ .

Během 1. a 2. injecktáže při měření chemickou metodou na Botiči docházelo k výraznému poklesu velikosti průtoku. Z důvodu nízkého rozlišení vodoměrné stanice ( $0,06\text{--}0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na každý cm) nelze přesně určit ani průběh poklesu průtoku. Navíc docházelo i ke kolísání pozad'ové konduktivity (hodnota na počátku měření byla o  $15 \text{ }\mu\text{S/cm}$  vyšší než na konci), přičemž nelze s jistotou říci, zda tento pokles byl lineární, skokový či dokonce zda konduktivita určitou dobu měření naopak i nestoupala. Tento problém byl navíc pravděpodobně umocněn spíše menším množstvím použité soli (5, resp. 7 kg na  $0,7\text{--}0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), protože měření s nedostatečným množstvím stopovače bývá citlivé na změny pozad'ové konduktivity (Kopáč, 2007). Protože měření bylo tímto způsobem narušeno a nedá se využít pro dosažení cílů mé práce, nadále se mu nevěnuji.

Interpretuji proto pouze 3. injecktáž, kdy podmínky pro měření byly vhodnější, protože již došlo k ustálení vodního stavu, pokles pozad'ové konduktivity byl pozvolnější (činil  $2 \text{ }\mu\text{S/cm}$  během 3. injecktáže) a bylo použito větší množství stopovače (9 kg na cca  $0,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Měření jsem opravila o pokles konduktivity s předpokladem, že probíhal lineárně. Průtok poté vyšel podle konduktoměru umístěného doprostřed profilu  $0,615 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , podle konduktoměru umístěného u levého břehu  $0,589 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Vypočítaný průměr z obou konduktometrů je  $0,602 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což činí relativní odchylku od vodoměrné stanice ČHMÚ  $-9,6 \%$ .

Při měření na Botiči nepřesáhl žádný naměřený průtok odchylky od průtoků dle ČHMÚ vyšší než  $10 \%$ , což lze vzhledem ke klesajícímu vodnímu stavu v průběhu měření považovat za úspěch. Nejlepší výsledek vykazuje měření FlowTrackerem2 3D, které probíhalo již za stálého vodního stavu a má odchylku  $+0,6 \%$ . Jedná se o nejpřesnější měření provedené v rámci této práce. Dobrých výsledků dosahuje i FlowTracker 2D a hydrometrická vrtule, ale tato měření probíhala za měnícího se vodního stavu a jsou tedy hůře interpretovatelná.

## 4.2 Žehrovka (Březina)

Před příjezdem na lokalitu Žehrovka (Březina) zde došlo ke skokovému zvýšení průtoku, pravděpodobně v důsledku upouštění z výše položeného rybníka, tento průtok však poté zůstal v průběhu celého měření již neměnný s hodnotou uváděnou dle vodoměrné stanice ČHMÚ  $0,130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Hodnota průtoku vzešlá z měření FlowTrackerem2 2D a FlowTrackerem2 3D vyšla  $0,145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , resp.  $0,146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , relativní odchylka od ČHMÚ činí +11,5 %, resp. +12,3 %. Dle měření hydrometrickou vrtulí vyšel mírně vyšší průtok ( $0,148 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) s relativní odchylkou +13,8 %. Měření pomocí plovákové metody s využitím korekčního koeficientu 0,86 vyšlo  $0,144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což činí relativní odchylku +10,8 %.

Měření pomocí chemické metody bylo opět narušeno výrazným kolísáním pozad'ové konduktivity (např. jen mezi začátkem kalibrace a 1. injektáží vzrostla o  $10 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Nejvíce patrné to bylo během 1. injektáže, protože zřejmě docházelo k vymývání vody jiného složení z toku kvůli předešlému upouštění vody z výše položeného rybníka. Před i po 1. injektáží pozad'ová konduktivita rostla i klesala (až o 15, resp.  $17 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ ), nebylo možné zjistit její přesný průběh během měření a tato data z tohoto důvodu neinterpretuji. V průběhu 2. a 3. injektáže na Žehrovce již pozad'ová konduktivita klesala přibližně lineárně (pokles o  $30 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ ), usuzuji tak z průběhu konduktivity mimo peaky způsobené umělou injektáží stopovače. Zaměřila jsem se tedy na tyto dvě injektáže a měření jsem opravila o pokles pozad'ové konduktivity s předpokladem jejího lineárního poklesu. Průtok pro 2. injektáž vyšel po zprůměrování z obou konduktometrů  $0,141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , pro 3. injektáž  $0,157 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Relativní odchylka od hodnot udávaných ČHMÚ tak byla +8,5 %, resp. +20,8 %. Je ovšem třeba poznamenat, že hodnoty se výrazně lišily i mezi oběma konduktometry (o 16 %, resp. 17 % z vyšší hodnoty). Pokud výsledky z obou injektáží zprůměruji, výsledná hodnota je  $0,149 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což činí relativní odchylku +12,8 %.

### 4.3 Libuňka (Sedmihorky)

Na toku Libuňka byl po celou dobu měření dle vodoměrné stanice ČHMÚ setrvalý průtok  $0,185 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Hodnota průtoku změřená pomocí FlowTrackeru2 3D byla  $0,178 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což činí relativní odchylku -3,8 %. Velmi podobný průtok byl zjištěn pomocí hydrometrické vrtule, a to  $0,176 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (rel. odchylka -4,9 %). Z měření plovákovou metodou vyšel rozsah hodnot průtoků  $0,178\text{--}0,218 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy s relativní odchylkou -3,8 % až +17,8 %, a to z důvodu použití korekčního koeficientu v rozsahu 0,55–0,67 (Kemel a Kolář, 1980).

Z chemické metody jsem tentokrát pro interpretaci využila všechny tři injektáže, přičemž během 1. injektáže jsem měření opravila o změnu pozad'ové konduktivity s předpokladem lineárního poklesu (nárůst o 1, resp.  $2 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Jednotlivé injektáže poté vyšly  $0,232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (rel. odchylka +25,4 %),  $0,202 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (rel. odchylka +9,2 %) a  $0,220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (rel. odchylka +18,9 %).

Pokud výsledky ze všech tří injektáží zprůměruji, dostanu hodnotu  $0,218 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což činí relativní odchylku +18,3 %.

## 5. Diskuse

Ke korektnímu měření průtoků různými metodami existuje mnoho postupů a norem, prezentované různými autory či institucemi, které se ne vždy ve všem shodují, či jsou postupně aktualizovány. Příkladem může být příručka Praktické cvičení z hydrometrie (Mattas, 2001), která je velmi detailní a návodná, ale pracuje se zastaralými údaji o minimálním počtu svislic při měření hydrometrickou vrtulí. Od publikace příručky došlo totiž k aktualizaci normy ISO 748, (2007), kdy se výrazně zvýšil minimální počet svislic. V současnosti ISO 748 opět prochází revizí. Na normě ISO 748 (2007) je překvapivé, že ač je v ní detailní popis jednotlivých metod výpočtu průměrné rychlosti na svislici z bodových měření (např. jedno- a dvoubodová metoda), nenachází se zde požadavek na minimální hloubky, ve kterých se jednotlivé metody mají použít. V této práci jsem se proto při volbě vhodné metody řídila doporučeními Boitena (2005). Zároveň je na ISO 748 (2007) zajímavé, že popisuje měření průtoků plovákovou metodou pomocí měření rychlostí v několika drahách, ale vůbec se nezabývá výpočtem průtoků z maximálních povrchových rychlostí. Proto jsem se u tohoto postupu odkazovala zejména na Kemela a Koláře (1980) a Mattase (2001). V Boitenovi (2005) bylo překvapivé, že se u chemické metody na rozdíl od detailního rozboru kontinuální injektáže téměř vůbec nezabývá injektáží jednorázovou. U měření chemickou metodou uvádí někteří autoři (Shaw, 1994; Boiten, 2005), že se hodí spíše na malé toky, jiní (Dobriyal et al., 2017) doporučují jeho užití na větších tocích. Zajímavá byla informace od J. Jiráka z ČHMÚ, že v praxi při měření na velkých tocích sůl nerozpuštěnou rovnou sypají do toku. Ač většina autorů (John, 1978; Tazioli, 2011) nabádá k injektování důkladně rozmíchaného roztoku, Kopáč (2007) ukazuje, že injektáž nerozpuštěné soli poskytuje za příznivých podmínek shodné výsledky jako měření provedená standardně.

Existuje několik publikací zabývajících se porovnáváním metod měření průtoků mezi sebou nebo zjišťováním přesností metod. Příkladem mohou být práce Dobriyala et al. (2017), Šebové et al. (2010), Tazioliho (2011) nebo Hasníkové a Pavláskova (2014). Tazioli (2011) se věnuje porovnávání měření průtoků pomocí vrtule a chemickou metodou a v závěru doporučuje používat chemickou metodu při tvorbě měrné křivky průtoků, když jsou průtoky příliš malé nebo naopak příliš velké na měření hydrometrickou vrtulí. Hasníková a Pavlásek (2014) porovnávají mezi sebou hodnoty průtoků zjištěné hydrometrickou vrtulí a FlowTrackerem.

Zároveň svá měření srovnávají s průtoky uváděnými ČHMÚ. Jejich výsledky ukazují, že se hodnoty průtoků zjištěné vrtulí a FlowTrackerem průměrně liší o  $\pm 5,3$  %. Odchyly obou metod od průtoků z měrných křivek ČHMÚ pak byly přes 10 %, což si autoři vysvětlují nepřesností měrné křivky nebo jejím zjišťováním pomocí jiné metody, např. ADCP. Šebová et al. (2010) se zabývají porovnáváním hydrometrické vrtule a FlowTrackeru a také středové a průměrové metody výpočtu průtoků. Podle jejich měření výsledné průtoky zjištěné vrtulí a FlowTrackerem měly minimální odchyly a při všech měřeních byly průtoky počítané středovou metodou vyšší než průtoky z průměrové metody. Z dat připojených k článku je ovšem patrné, že minimálně v jednom měření byly dílčí průtoky větší než 10 % celkového průtoků, což odporuje normě ISO 748 (2007) a měření tak neproběhlo zcela korektně.

## 5.1 Srovnání výsledků jednotlivých metod

V následujících odstavcích se zabývám vlastním měřením, a to na Žehrovce (Březina) a Libuňce (Sedmihorky), kdy nedocházelo k poklesu průtoků v průběhu jednotlivých měření ani ke změně průtoků při měření různými metodami, což umožňuje snadno srovnat výsledky dosažené jednotlivými metodami.

Z měření se ukazuje, že v případě Žehrovky byla všechna má měření nadhodnocená, a to minimálně o 8,5 %. Zajímavá je vysoká hodnota odchylek u velmi přesných metod měření, jako jsou rychlostní metody v podobě FlowTrackerů a hydrometrické vrtule (De Doncker et al. 2008, Šebová et al., 2010) a také v případě plovákové metody. Tyto přístupy dávají velmi podobné hodnoty průtoků ( $0,144\text{--}0,148 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), přičemž jejich vzájemná největší odchylka nepřesahuje 2,8 %. Jelikož rozlišení vodoměrné stanice na stanici Březina je cca  $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , domnívám se, že průtok na profilu ve skutečnosti nebyl  $0,130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ale spíše vyšší, okolo  $0,145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (následující bod vodoměrné křivky je  $0,152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), jak shodně naznačují má 4 nezávislá měření. Pokud bych k této hodnotě vztáhla průměr měření chemickou metodou, dostala bych její relativní odchylku pouze +2,8 %. Měření pomocí všech metod na profilu Žehrovka (Březina) tak interpretuji jako velmi přesná.

Důvodem takto přesného měření může být vhodně zvolený práh (dle doporučení J. Jiráka) pro měření FlowTrackery a vrtulí s laminárním prouděním a průtokem rovnoměrně rozprostřeným po celé šířce měrného profilu. V případě měření plovákovou metodou byl zvolen dostatečně dlouhý, přímý, zdánlivě ideální měrný úsek, použitá dřevěná destička měla nejspíš ideální vlastnosti hladinového plováku a v místě měření nedocházelo k ovlivnění plováku větrem. Měření chemickou metodou proběhlo pod vodoměrnou stanicí v turbulentním úseku toku, který



je k takovému měření vhodný (Shaw, 1994). Při měření ovšem nebyla dodržena doporučená vzdálenost promísení mezi injektáží a měřením v důsledku omezené délky úseku s příhodným typem proudění. Tato skutečnost mohla teoreticky negativně ovlivnit výsledky (Bell, 1969). U měření chemickou metodou bylo relativně velké rozpětí hodnot z pohledu injektáží i obou konduktometrů, o čemž se zmíním v následující kapitole.

Měření na Libuňce vykazuje velmi nízké relativní odchylky od hodnoty uváděné ČHMÚ v případě FlowTrackeru 2 3D (-3,8 %) a v případě hydrometrické vrtule (-4,9 %), kdy obě metody shodně ukazují průtok  $0,176\text{--}0,178 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . K měření došlo v úseku laminárního proudění s pravidelným korytem, na profilu s rovnoměrně rozdělenými rychlostmi proudění a průtoky, což představuje ideální podmínky měření pro rychlostní metody (John, 1978; ISO 748, 2007). Měření FlowTrackerem 2 3D je pravděpodobně přesnější než měření hydrometrickou vrtulí, protože při březích byly velmi malé rychlosti proudění, pro jejichž změření je vhodnější právě FlowTracker2 (SonTek, 2019). U plovákové metody je větší rozsah relativní odchylky (-3,8 % až +17,8 %), protože dle literatury (Kemel a Kolář, 1980) nelze přesněji určit jednoznačnou hodnotu korekčního koeficientu. Spodní hranice rozsahu hodnot je ovšem shodná s hodnotami zjištěnými ostatními rychlostními metodami, proto se lze domnívat, že se hodnota korekčního koeficientu pro výpočet průtoku z maximálních povrchových rychlostí bude spíše blížit spodní hranici hodnot. Překvapivý je vysoký nesoulad chemické metody s průtokem uváděným ČHMÚ i s hodnotami získanými FlowTrackerem 2 3D a hydrometrickou vrtulí, kdy rozdíl činí cca 20 %. Podobně jako u měření na Žehrovce zde byl krátký měrný úsek turbulentního proudění neodpovídající dle literatury (Bell, 1969) dostatečné vzdálenosti promísení. Toto může být zdrojem velkých nepřesností. Dalším faktorem negativně ovlivňujícím proudění by mohla být přítomnost velkého množství jemných sedimentů v korytě, jejichž jílovitá složka by mohla adsorbovat malou část injektované soli (Tazioli, 2011). Adsorbce by ale pravděpodobně neměla na měření dostatečně velký vliv, aby sama vysvětlila tak velký rozdíl měření.

## 5.2 Výsledky chemické metody

Protože nebylo možné hned několik měření chemickou metodou vyhodnotit a protože je z dat zřejmé, že hodnoty výsledného průtoku se velmi liší pro jednotlivé injektáže i jednotlivé konduktometry, rozhodla jsem se chemické metodě věnovat pozornost. Velkým problémem, který zhoršoval či znemožňoval interpretaci dat, byla měnící se požadovaná konduktivita a nemožnost přesně odhadnout její průběh. V průběhu vyhodnocování několika injektáží jsem

počítala průtok s předpokladem lineární změny pozad'ové konduktivity, pokud byl tento předpoklad chybný, mohl se negativně odrazit na výsledcích. Řešením tohoto problému by u budoucích měření mohl být další konduktoměr umístěný v toku nad místem injektáže monitorující hodnotu pozad'ové konduktivity během celého měření.

V tabulce 6 jsou uvedeny vypočtené hodnoty průtoků z dat pocházejících z obou použitých konduktoměrů, vypočteny jsou zvlášť pro jednotlivé injektáže a jsou zde uvedeny velikosti relativních odchylek mezi nimi. V porovnání měření chemickou metodou pomocí relativních odchylek průtoků z obou konduktoměrů vychází nejlépe 3. měření na Botiči, kde je relativní odchylka -4,2 %. Relativní odchylky průtoků z obou konduktoměrů na Žehrovce dosahují kolem 20 %, zatímco u měření na Libuňce dosahují až kolem -50 %. Tak vysoké odchylky jsou zřejmě způsobeny nedostatečným promícháním soli v celé šířce toku, které by mohlo být důsledkem nedostatečné vzdálenosti mezi místem injektáže a měrným profilem, což je právě případ Žehrovky i Libuňky. Vzhledem k tomu, že úsek toku použitý k měření chemickou metodou byl u Libuňky přímý na rozdíl od Žehrovky, kde byly zákruty, promíchání soli mohlo být na Libuňce horší než na Žehrovce i z tohoto důvodu. Na Botiči byla vzdálenost promísení dle odborné literatury (Bell, 1969) dostatečně dlouhá, což by odpovídalo tomu, že problémem ostatních méně přesných měření byla právě nedostatečná vzdálenost mezi místem injektáže a místem měření.

*Tabulka 6. Hodnoty průtoků naměřené chemickou metodou.*

| Místo měření             | Injektáž | Množství soli (kg) | Průtok kond. 1 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Průtok kond. 2 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Relativní odchylka 1 a 2 (%) | Průměr hodnot ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|--------------------------|----------|--------------------|---|---|------------------------------|--|
| Botič<br>(Praha – Nusle) | 1.       | 5                  | -   | -   | -                            | -  |
|                          | 2.       | 7                  | -   | -   | -                            | -  |
|                          | 3.       | 9                  | 0,615   | 0,589   | -4,2                         | 0,602  |
| Žehrovka<br>(Březina)    | 1.       | 3                  | -   | -   | -                            | -  |
|                          | 2.       | 3                  | 0,128   | 0,153   | +19,5                        | 0,141  |
|                          | 3.       | 3                  | 0,142   | 0,171   | +20,4                        | 0,157  |
| Libuňka<br>(Sedmihorky)  | 1.       | 5                  | 0,318   | 0,145   | -54,4                        | 0,232  |
|                          | 2.       | 7                  | 0,234   | 0,169   | -27,8                        | 0,202  |
|                          | 3.       | 7                  | 0,288   | 0,151   | -47,6                        | 0,220  |

### 5.3 Srovnání relativní odchylky jednotlivých metod s přesností uváděnou v literatuře

V této kapitole zhodnotím maximální a průměrné relativní odchylky měření u jednotlivých metod a porovnáám je s přesnostmi uvedenými dle odborné literatury v rešeršní části práce. Do výpočtu průměrných odchylek jsem nezahrnovala měření vrtulí a FlowTrackerem 2D na Botiči, protože z důvodu klesajícího vodního stavu nebylo možné určit přesnou hodnotu průtoku. U plovákové metody uvedu průměrné a maximální odchylky jako rozpětí hodnot kvůli nemožnosti přesněji určit korekční koeficient. Průměrné a maximální relativní odchylky jsou znázorněny v tabulce 7.

*Tabulka 7. Hodnoty průměrných a maximálních relativních odchylek jednotlivých metod. Hodnoty v závorkách označují průměrné a maximální odchylky vypočtené z hodnot průtoku, které jsou v případě Žehrovky vztažené místo k průtoku dle vodoměrné stanice k hodnotě předpokládaného skutečného průtoku  $0,145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .*

| Metoda měření průtoku | Průměrná relativní odchylka (%) | Maximální relativní odchylka (%) |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Hydrometrická vrtule  | 9,3 (3,5)                       | 13,8 (4,9)                       |
| FlowTracker           | 7,1 (1,7)                       | 12,3 (3,8)                       |
| Plováková metoda      | 7,3–14,3 (2,3–9,3)              | 10,8–17,8 (3,8–17,8)             |
| Chemická metoda       | 15,3 (12,4)                     | 25,4                             |

Hydrometrická vrtule má průměrnou relativní odchylku měření od ČHMÚ 9,3 % s maximální odchylkou 13,8 %. Takové výsledky dává dle Kříže et al. (1988) vrtule při měření ve zhoršených podmínkách. Moje měření ovšem probíhalo v podmínkách dle mého názoru takřka ideálních, takže bych očekávala přesnosti výrazně lepší. Při pohledu na přesnosti uvedené v závorkách počítané s upraveným průtokem ze Žehrovky (předpokládaný skutečný průtok na základě 4 nezávislých měření, viz kapitola 5.1) už vychází přesnosti do 5 % i v případě maximální odchylky, což dle literatury (Mattas, 2001; De Doncker et al., 2008) představuje optimální měření touto metodou. FlowTracker má průměrnou relativní odchylku měření při porovnání s ČHMÚ 7,1 % a maximální odchylku 12,3 %. Podobně jako u vrtule jde o neuspokojivou přesnost, která se opět při použití upraveného průtoku ze Žehrovky vylepší: průměrná odchylka je pouhých 1,7 % a maximální odchylka 3,8 %, jde tudíž o velmi přesné měření (Huhta a Sloat, 2007). Jde o vůbec nejnižší hodnoty průměrných a maximálních

odchylek a ukazuje to FlowTracker jako nejpřesnější metodu celého měření. Měření plovákovou metodou mělo průměrné relativní odchylky měření v závislosti na korekčním koeficientu 7,3–14,3 % s maximálními odchylkami 10,8–17,8 %. Jde v zásadě o uspokojivé přesnosti, které dle literatury obvykle dosahují 10 i více % (John, 1978; Kříž et al., 1988). Při použití upraveného průtoku je ovšem vidět, že plováková metoda má za příznivých podmínek potenciál být daleko přesnější (průměrná odchylka 2,3–9,3 %). Měření chemickou metodou má průměrnou relativní odchylku 15,3 % s maximální odchylkou 25,4 %. Tato metoda stabilně neposkytovala dobré výsledky, přičemž ani po výpočtu s upraveným průtokem ze Žehrovky neklesla relativní odchylka pod 12 %. Dle Daye (1976) i dle Bruthanse (2006) jde o nezvykle vysoké chyby průtoků. Bylo by ovšem nesprávné na základě několika mála měření odepsat chemickou metodu jako nepřesnou, protože v kontrastu s měřením rychlostními metodami nebyly při měření dodrženy všechny náležitosti. U 2 ze 3 měření chemickou metodou nebyla dostatečná vzdálenost mezi místem injektáže a místem měření z důvodu omezených úseků s turbulentním prouděním.

## 6. Závěr

V rešeršní části práce představuji hojně využívané metody pro jednorázová i kontinuální měření průtoků, konkrétně jde o rychlostní metody, chemickou metodu, objemovou metodu, metodu zúžení toku, metodu výpočtu ze známého průběhu hladiny a měrnou křivku průtoků. Popisuji principy správného provedení měření, výpočtu a vyhodnocení průtoků, výhody, nevýhody a přesnosti jednotlivých metod, stejně jako typy toků, na kterých je nejvhodnější dané metody použít. Na toto téma bylo publikováno mnoho dobře dostupných prací, zaměřených obecně na metody měření průtoku nebo konkrétně na specifika jednotlivých způsobů měření. Zjistila jsem, že zdroje se místy rozcházejí v doporučené metodice měření či v udávaných přesnostech jednotlivých metod. Tyto odlišnosti v práci uvádím a diskutuji. V diskusní části práce jsem se zaměřila také na publikace, věnující se srovnávání hodnot průtoků zjištěných jednotlivými metodami.

V praktické části se věnuji měření průtoku v terénu na povrchových tocích Botič, Žehrovka a Libuňka, osazených vodoměrnou stanicí ČHMÚ s kontinuálním záznamem měření průtoků. Měřila jsem vybranými jednorázovými metodami, konkrétně hydrometrickou vrtulí, FlowTrackerem, plovákovou metodou a chemickou metodou. Toky jsem zvolila na základě doporučení konzultanta M. Šobra a J. Jiráka z ČHMÚ. V rámci toku jsem pečlivě vybrala profily a úseky toku tak, aby byly dle údajů z dostupné literatury co možná nejvhodnější pro

jednotlivé metody. Provedla jsem měření a naměřená data jsem vyhodnotila a zpracovala dle běžně používané metodiky. Následně jsem průtoky porovnávala pomocí výpočtu relativních odchylek s hodnotami průtoků udávanými vodoměrnými stanicemi ČHMÚ. Zároveň jsem porovnávala výsledky z jednotlivých metod mezi sebou, výsledky diskutuji s ohledem na údaje z odborné literatury.

Z analýzy 14 naměřených průtoků jsem zjistila, že v rámci této práce poskytovala nejlepší výsledky měření provedená FlowTrackerem. Relativní odchylka této metody byla v průměru 7 %. Ostatní používané rychlostní metody (vrtule a plováky) dávaly taktéž přijatelné výsledky (průměrná relativní odchylka 9 %, resp. 7–14 %). Narazila jsem ovšem na problém nízkého rozlišení vodoměrných stanic, což může hodnotu relativní odchylky znatelně ovlivňovat. Minimálně v jednom případě je velmi pravděpodobné, že měření rychlostními metodami bylo z tohoto důvodu ve skutečnosti přesnější než dostupný údaj o průtoku dle ČHMÚ. V takovém případě by průměrná relativní odchylka rychlostních metod byla ještě nižší. Naopak chemická metoda vykazovala stabilně nejméně přesné průtoky (průměrná relativní odchylka 15 %, nejvyšší relativní odchylka až 25 %). Je ovšem třeba dodat, že toto zhodnocení plyne z malého počtu měření a pro přesnější závěry by bylo potřeba prověření většího souboru dat s využitím vodoměrných stanic o vyšším rozlišení. Nicméně naměřená data i tak dávají určitou představu o tom, s jakými relativními odchylkami lze počítat při měření, které provádí poučená osoba při dodržování pravidel a doporučení z odborné literatury.

## 7. Použitá literatura

- ACREMAN, M., 2001. Ethical aspects of water and ecosystems. *Water Policy*. **3**(3), 257-265. Dostupné z: doi:10.1016/S1366-7017(01)00009-5
- BELL, F. C., 1969. *Chemical gauging of streamflow*. Manly Vale, Australia. Report No. 117. Water Research Laboratory, Faculty of Engineering, UNSW.
- BELTAOS, S., 2011. Developing winter flow rating relationships using slope-area hydraulics. *River Research and Applications*. **27**, 1076-1089. Dostupné z: doi:DOI: 10.1002/rra.1404
- BOITEN, W., 2005. *Hydrometry: The Delft Lecture Note Series*. Revised edition. Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN 0-203-97109-4.
- BRACA, G., 2008. *Stage-Discharge Relationships in Open Channels: Practices and Problems*. Trento: Università degli Studi di Trento. ISBN 978-88-8443-230-8.
- Britannica, 2021. Doppler effect. *Britannica* [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Doppler-effect>
- BRUTHANS, J., 2006. *Využití přirozených stopovačů (18O; 3H; freony; SF6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR*. Praha. MS PřF UK.
- COON, W. F., 1998. *Estimation of Roughness Coefficients of Natural Stream Channels with Vegetated Banks: USGS Water Supply Paper 2441*. Denver CO.
- ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT, 2018. *Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou: Postup pro provádění úředního měření metodou rychlostního pole, objemovou metodou, vážicí metodou, přenosnou měřicí sestavou s průtokoměrem, měrnými přelivy a žlaby*. Brno: Český metrologický institut.
- ČHMÚ, 2021. Pozorovací síť. *Český hydrometeorologický ústav: Úsek hydrologie oddělení povrchových vod* [online]. Praha: ČHMÚ [cit. 2021-7-3]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opv/stanice.html>
- ČKSVV, 2021. *Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí: KALIBRAČNÍ PROCEDURA* [online]. Praha 6: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://cksvv.vuv.cz/index.php/cz/kalibracni-procedura>
- ČSN EN ISO 772: *Hydrometrická měření - Terminologie*, 2012. Praha: ÚNMZ.
- ČSN ISO 1070: *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Metoda sklonu a plochy*, 1994. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN ISO 2537: *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvem*, 1993. Třetí vydání. Praha: Český normalizační institut.

ČSN ISO 8363: *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Obecné návody pro výběr metod*, 1993. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření.

DAY, T. J., 1976. On The Precision Of Salt Dilution Gauging. *Journal of Hydrology*. **31**, 293-306.

DE DONCKER, L., P. TROCH a R. VERHOEVEN, 2008. Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow Measurement and Instrumentation*. **19**(1), 29-40. Dostupné z: doi:10.1016/j.flowmeasinst.2007.08.007

DOBRIYAL, P., R. BADOLA, C. TUPOI a S. A. HUSSAIN, 2017. A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Applied Water Science*. **7**(6), 2617–2628. Dostupné z: doi:10.1007/s13201-016-0488-y

FRIEDERICH, H. a P. L. SMART, 1982. The classification of autogenic percolation waters in karst aquifers: A study in G. B. Cave, Mendip Hills, England. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society*. **16**(2), 143-159.

GEES, A., 1990. Flow measurement under difficult measuring conditions: field experience with the salt dilution method. *Proceedings of two Lausanne Symposia*. IAHS, (Publ. 193).

HARRELSON, C. C., C. L. RAWLINS a J. P. POTYONDY, 1994. *Stream channel reference sites: An illustrated guide to field technique*. Fort Collins: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Dostupné z: doi:10.2737/RM-GTR-245

HASNÍKOVÁ, E. a J. PAVLÁSEK, 2014. Porovnání různých hydrometrických metod na malých vodních tocích. *Vodní hospodářství*. **64**(12), 6-8.

HLOM, J. a P. BALVÍN, 2019. Měření malých průtoků pomocí měrných přelivů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. **61**(6), 48-55. Dostupné z: doi:10.46555/VTEI.2019.09.007

HUHTA, C. a J. SLOAT, 2007. *Discharge Uncertainty Calculations Using a SonTek FlowTracker*. San Diego: SonTek/YSI.

HYDROMETRICS, 2017. OTT C2. *HYDROMETRICS s.r.o.* [online]. Nehvizdy: HYDROMETRICS [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <http://www.hydrometrics.cz/main-navigation/ott-produkty/prutok-173/ott-c2-487/>

CHOW, V. T., 1959. *Open-Channel Hydraulics*. International Student edition. G. McGraw Hill Book Company.

IAEA, 2021. Radiotracers. *IAEA* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/topics/radiotracers>

ISO 748, 2007. *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. Fourth edition. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

- JARRETT, R. D., 1986. Evaluation of the Slope-Area Method for Computing Peak Discharge. SUBITZKY, Seymour, ed. *Selected Papers in the Hydrologic Sciences*. s. 13-24.
- JOHN, P. H., 1978. Discharge Measurement in Lower Order Streams. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*. **63**(6), 731-755. Dostupné z: doi:10.1002/iroh.19780630602
- JURASCHEK, M., 2002. Durchflussermittlung mit der Salzverdünnungsmethode. *Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg*.
- KÄSS, W., H. BEHRENS, T. HIMMELSBACH, et al., 1998. *Tracer technique in geohydrology*. Rotterdam: Balkema.
- KEMEL, M. a V. KOLÁŘ, 1980. *Hydrologie*. Praha: ČVUT.
- KENNEDY, E. J., 1984. *Techniques of Water-Resources Investigations: Book 3, Chapter A10, Discharge ratings at gauging stations*. Washington: U.S. Geological Survey.
- KILPATRICK, F. A. a V. R. SCHNEIDER, 1983. *Techniques of Water-Resources Investigations: Book 3, Chapter A14, Use of flumes in measuring discharge*. Washington: U.S. Geological Survey.
- KILPATRICK, F. A. a E. D. COBB, 1985. *Techniques of Water-Resources Investigations: Book 3, Chapter A16, Measurement of discharge using tracers*. Washington: U.S. Geological Survey.
- KOPÁČ, J., 2007. *Měření průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity*. Praha, 79 s. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta UK. Vedoucí práce Mgr. Jiří Bruthans, PhD.
- KŘÍŽ, Vladislav, et al., 1988. *Hydrometrie*. Praha: SPN. Učebnice pro vys. školy. ISBN (Váz.).
- LEIBUNDGUT, C. a J. SEIBERT, 2011. Tracer Hydrology. WILDERER, Peter, ed. *Treatise on Water Science*. Elsevier Science, s. 215-236. ISBN 9780444531995.
- MATTAS, D., 2001. *Praktické cvičení z hydrometrie: návod*. ČVUT v Praze, Stavební fakulta katedra hydrauliky a hydrologie. Praha.
- MATTAS, D., 2014. *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka. ISBN 978-80-87402-27-6.
- MORLOCK, S. E. a G. T. FISHER, 2002. *Hydroacoustic Current Meters for the Measurement of Discharge in Shallow Rivers and Streams*. Colorado.
- MUELLER, D. S. a C. R. WAGNER, 2007. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. *Techniques and Methods*. Virginia: U.S. Geological Survey, Chapter 22 of Book 3, Section A.
- MUSTE, M., K. YU a M. SPASOJEVIC, 2004. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*. **15**(1), 1-16. Dostupné z: doi:10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.001



- MUSTE, M., C. BACOTIU a D. THOMAS, 2019. Evaluation of the slope-area method for continuous streamflow monitoring. *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*. Dostupné z: doi:10.3850/38WC092019-1860
- PARS AQUA, 2021. Odborný článek o měření průtoku. *PARS aqua, s.r.o. - Parshallovy žlaby* [online]. Praha 5: PARS aqua [cit. 2021-6-22]. Dostupné z: <https://pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html>
- REHMEL, M., 2007. Application of Acoustic Doppler Velocimeters for Streamflow Measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*. **133**(12), 1433-1438. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1433)
- RIGGS, H. C., 1976. A simplified slope-area method for estimating flood discharges in natural channels. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*. **4**(3), 285-291.
- SCHMIDT, A. R. a B. C. YEN, 2001. Stage-Discharge Relationship in Open Channels. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*.
- SHAW, E. M., 1994. *Hydrology in practice*. 3th ed. London: Chapman & Hall. ISBN 0-412-48290-8.
- SHOPE, C. L., S. BARTSCH, K. KIM, et al., 2013. A weighted, multi-method approach for accurate basin-wide streamflow estimation in an ungauged watershed. *Journal of Hydrology*. **494**, 72-82. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.035
- SONTEK, 2018. FlowTracker Handheld-ADV for field velocity measurements, 2D or 3D currents, with SmartQC, ISO and USGS standards. *SonTek Acoustic Doppler Current Profiler for Flow Measurement and Velocity Data Collection* [online]. San Diego: SonTek / Xylem [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <https://www.sontek.com/flowtracker2>
- SONTEK, 2019. *FlowTracker2: USER'S MANUAL 1.6*. San Diego.
- SOUPIR, M. L., S. MOSTAGHIMI a C. E. MITCHEM, JR., 2009. A Comparative Study of Stream-Gaging Techniques for Low-Flow Measurements in Two Virginia Tributaries. *Journal of the American Water Resources Association*. **45**(1), 110-122. Dostupné z: doi:10.1111/j.1752-1688.2008.00264.x
- ŠEBOVÁ, E., R. DULOVÍČOVÁ a Y. VELÍSKOVÁ, 2010. Porovnanie meraní prietoku hydrometrovacím krídlom a digitálnym prístrojom FlowTracker na toku Vydrica. *Acta Hydrologica Slovaca*. **11**(2), 227-233.
- TAZIOLI, A., 2011. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*. **56**(7), 1314-1324. Dostupné z: doi:10.1080/02626667.2011.607822
- TELEDYNE, 2011. *Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation A Practical Primer*. California: Teledyne RD Instruments.
- WTW GmbH, 2009. *Cond 3310 Operating Manual*. Weilheim: WTW.

YORKE, T. H. a K. A. OBERG, 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. *Flow Measurement and Instrumentation*. **13**(5-6), 191-195. Dostupné z: doi:10.1016/S0955-5986(02)00051-1

ZEMAN, O., 1999. *Hydrogeologické poměry Českého krasu jižně od řeky Berounky*. Praha, 123 s. MS PřF UK.

## 8. Seznam obrázků

- Obr. 1. Hydrometrická vrtule Ott C-2
- Obr. 2. Schéma výpočtu průtoku grafickou metodou
- Obr. 3. Schéma rozdělení profilu podle průměrové metody
- Obr. 4. Schéma rozdělení profilu podle středové metody
- Obr. 5. Typy plováků
- Obr. 6. Schéma měření rychlosti proudění pomocí plováků
- Obr. 7. Schéma vynesení průměrných rychlostí do polygonu
- Obr. 8. 2D sonda FlowTrackeru
- Obr. 9. Měření pomocí ADCP na laně
- Obr. 10. Koncentrace v čase u jednorázové a kontinuální injektáže
- Obr. 11. Znázornění Thomsonova a Ponceletova přelivu
- Obr. 12. Návrh konstrukce Parshallova žlabu
- Obr. 13. Znázornění grafu měrné křivky
- Obr. 14. Přístroje využití k měření průtoku – FlowTracker a konduktoměr
- Obr. 15. Měření na Botiči 30.6.2021
- Obr. 16. Měření na Žehrovce 8.7.2021
- Obr. 17. Měření na Libuňce 8.7.2021

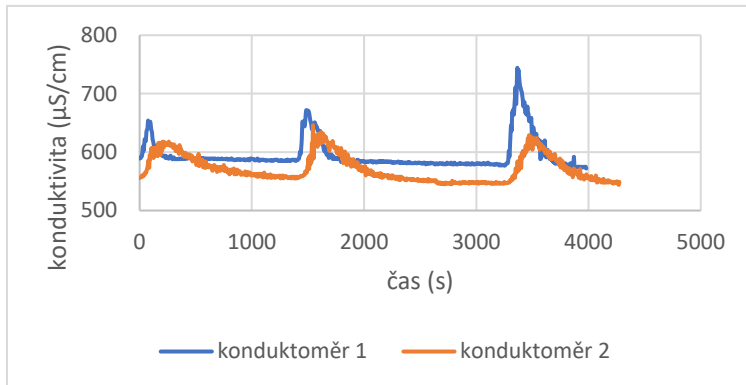
## 9. Seznam tabulek

- Tabulka 1. Minimální počet svislic podle šířky toku
- Tabulka 2. Hodnota součinitele  $\kappa$  podle typu plováku
- Tabulka 3. Objemy nádob k použití při různých velikostech průtoku
- Tabulka 4. Koficient drsnosti  $n$  v závislosti na velikosti materiálu dna
- Tabulka 5. Naměřené průtoky a jejich relativní odchylky od průtoků ČHMÚ
- Tabulka 6. Hodnoty průtoků naměřené chemickou metodou
- Tabulka 7. Průměrné a maximální relativní odchylky jednotlivých metod

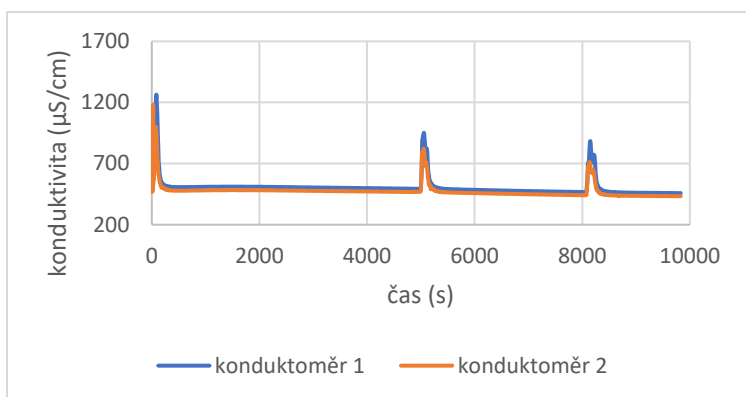
## 10. Přílohy

V přílohách 1–3 jsou grafy konduktivity z obou konduktometrů v čase, v přílohách 4–7 jsou tabulky se stručnými daty z FlowTrackerů, v přílohách 8–10 jsou tabulky se stručnými daty z vrtule a v přílohách 11–12 jsou tabulky se stručnými daty k plovákové metodě.

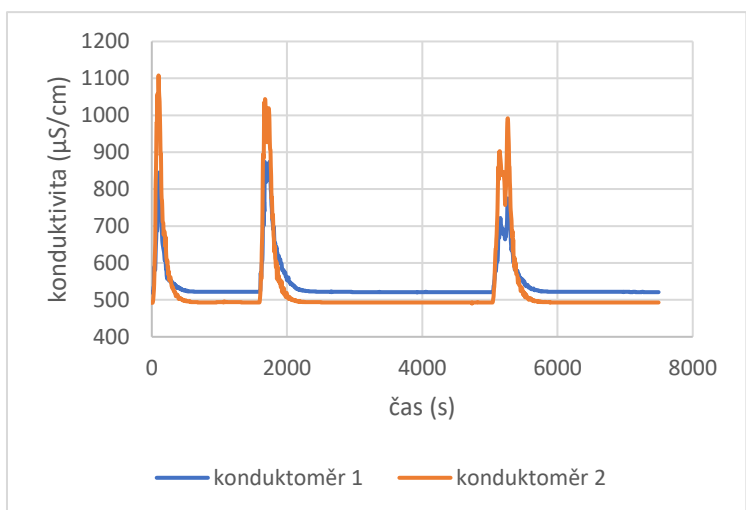
Příloha 1. Graf průběhu konduktivity v čase – Botič (Praha–Nusle), 30.6.2021



Příloha 2. Graf průběhu konduktivity v čase – Žehrovka (Březina), 8.7.2021



Příloha 3. Graf průběhu konduktivity v čase – Libuňka (Sedmihorky), 8.7.2021



Příloha 4. Tabulka s daty z měření FlowTrackery – Botič (Praha–Nusle), 30.6.2021

|   | FT 2D | FT2 3D |
|---|-------|--------|
| počet svislic                               | 35    | 35     |
| nejistota měření (%)                        | 1,20  | 1,73   |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) | 2,435 | 2,31   |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          | 0,639 | 0,538  |

Příloha 5. Tabulka s daty z měření Flowtrackerem2 2D – Žehrovka (Březina), 8.7.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,002 | 0,005 | 0,008 | 0,01  | 0,011 | 0,01  | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| svislice                                    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,008 | 0,01  | 0,01  | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,004 |
| nejistota měření (%)                        |       |       |       | 3,551 |       |       |       |       |       |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 0,625 |       |       |       |       |       |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,145 |       |       |       |       |       |

Příloha 6. Tabulka s daty z měření FlowTrackerem2 3D – Žehrovka (Březina), 8.7.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,002 | 0,005 | 0,008 | 0,011 | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01 |
| svislice                                    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18   |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,009 | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0    |
| nejistota měření (%)                        |       |       |       | 3,551 |       |       |       |       |      |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 0,603 |       |       |       |       |      |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,146 |       |       |       |       |      |

Příloha 7. Tabulka s daty z měření FlowTrackerem2 3D – Libuňka (Sedmihorky), 8.7.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0     | 0,002 | 0,002 | 0,01  | 0,012 | 0,014 | 0,015 | 0,015 | 0,013 | 0,011 |
| svislice                                    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    |       |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,016 | 0,016 | 0,01  | 0,015 | 0,015 | 0,01  | 0,003 | 0,001 | 0     |       |
| nejistota měření (%)                        |       |       |       | 2,986 |       |       |       |       |       |       |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 2,132 |       |       |       |       |       |       |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,178 |       |       |       |       |       |       |

Příloha 8. Tabulka s daty z měření vrtulí – Botič (Praha–Nusle), 30.6.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0     | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,009 | 0,013 | 0,015 | 0,019 | 0,018 |
| svislice                                    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,023 | 0,024 | 0,028 | 0,032 | 0,033 | 0,033 | 0,035 | 0,032 | 0,029 | 0,027 | 0,026 | 0,024 |
| svislice                                    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    |       |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,021 | 0,018 | 0,015 | 0,012 | 0,01  | 0,009 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0     |       |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 2,361 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,548 |       |       |       |       |       |       |       |       |

Příloha 9. Tabulka s daty z měření vrtulí – Žehrovka (Březina), 8.7.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8    | 9     |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,004 | 0,009 | 0,011 | 0,01  | 0,011 | 0,01  | 0,01  | 0,01 | 0,009 |
| svislice                                    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17   |       |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,011 | 0,01  | 0,01  | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0    |       |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 0,588 |       |       |       |      |       |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,148 |       |       |       |      |       |

Příloha 10. Tabulka s daty z měření vrtulí – Libuňka (Sedmihorky), 8.7.2021

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| svislice                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0     | 0,006 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,018 | 0,022 | 0,017 |
| svislice                                    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)            | 0,015 | 0,022 | 0,015 | 0,013 | 0,011 | 0,002 | 0     | 0     |
| plocha průtočného profilu (m <sup>2</sup> ) |       |       |       | 2,089 |       |       |       |       |
| celkový průtok (m <sup>3</sup> /s)          |       |       |       | 0,176 |       |       |       |       |

Příloha 11. Tabulka s daty z měření plovákem – Žehrovka (Březina), 8.7.2021

|   |       |       |       |   |       |
|---|-------|-------|-------|---|-------|
| dráha                                   | 1     | 2     | 3     | celková plocha (m <sup>2</sup> )          | 0,916 |
| dílčí průtočná plocha (m <sup>2</sup> ) | 0,443 | 0,255 | 0,218 | průtok před korekcí (m <sup>3</sup> /s)   | 0,167 |
| dílčí průtok (m <sup>3</sup> /s)        | 0,096 | 0,052 | 0,02  | průtok (m <sup>3</sup> /s) s korekcí 0,86 | 0,144 |
| počet vypuštění                         | 2     | 2     | 2     |   |       |

Příloha 12. Tabulka s daty z měření plovákem – Libuňka (Sedmihorky), 8.7.2021

|                 |   |  |             |
|-----------------|---|--|-------------|
| dráha           | 1 | celková plocha (m <sup>2</sup> )               | 2,088       |
| počet vypuštění | 3 | průtok před korekcí (m <sup>3</sup> /s)        | 0,325       |
|                 |   | průtok (m <sup>3</sup> /s) s korekcí 0,55-0,67 | 0,178-0,218 |