

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Studijní obor: Povrchová a podzemní voda



Marek Burdych

**Měření průtoku povrchových toků chemickou
metodou**

**Measurement of Stream Flow Rate Using Salt Dilution
Method**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Ondovčín, Ph.D.

Praha, 2023

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

V dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji mockrát mému školiteli Tomáši Ondovčínovi Ph.D. za ochotu, pomoc a nevyčíslitelnou trpělivost při psaní bakalářské práce. Dále velmi děkuji doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi Ph.D. za uspořádání terénního měření a poskytnutí terénní výbavy a RNDr. Miroslavu Šobrovi Ph.D. za pomoc s výběrem vhodné literatury. Oběma pak za cenné připomínky při psaní práce. Děkuji mamince za podporu během studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá měřením průtoku chemickou metodou. Rešeršní část práce podává přehled nejdůležitějších metod měření průtoku v povrchových tocích (Hydrometrická vrtule, plováková metoda, FlowTracker, ADCP, objemová metoda a metoda výpočtu průtoku ze známého množství průřezu koryta toku). Velká část je věnovaná chemické metodě. V druhé části je detailně popsáno terénní měření průtoku chemickou metodou na řece Loděnici a prezentovány výsledky. Měření probíhalo na třech lokalitách s použitím pěti konduktometrů. Konduktometry byly rozděleny do dvou skupin, přičemž každá skupina měřila v různých vzdálenostech od injektáže. Šestý konduktometr měřil pozadovou hodnotu konduktivity během celého experimentu.

Vypočítané hodnoty průtoků jsou porovnány s hodnotami vycházejícího z měření FlowTrackerem a nedalekou vodoměrnou stanicí ČHMÚ. Odchytky průtoků byly interpretovány jako ztráty stopovače na úseku měření. Tyto ztráty jsou v práci odhadnuty.

Klíčová slova: hydrologie, povrchová voda, vodní tok, chemická metoda, konduktivita, stopovač

Abstract

Tracer dilution method for measuring flow rate in surface streams is the main topic of the bachelor's thesis. The first part contains a summary of the most important flow measuring techniques for surface streams, including current meter, float method, FlowTracker, ADCP, volumetric method, and computing techniques based on channel cross-section data. Large part is dedicated to tracer dilution method. The findings of field measurements of flow made on the Loďnice River using the salt dilution approach are detailed in the second section. Five conductometers were used to measure the water conductivity at three different sites. Conductometry was performed simultaneously in two different distances from injection site. Throughout the experiment, a sixth conductometer recorded the background conductivity value as a standard.

The predicted flow values are compared to those acquired from nearby hydrometric station of the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) and from observations made using Flowtracker. Differences in measured flow rate were interpreted as tracer losses. These losses were estimated.

Keywords: hydrology, surface water, water stream, tracer dilution, conductivity, tracer

Obsah

1	Úvod	1
2	Přehled metod měření průtoku	2
2.1	Rychlostní metody	2
2.1.1	Hydrometrická vrtule	2
2.1.2	Plováková metoda	3
2.1.3	ADCP	4
2.1.4	FlowTracker	6
2.2	Chemická metoda	7
2.3	Objemová metoda	7
2.4	Metoda výpočtu průtoku ze známého průřezu koryta toku	8
3	Chemická metoda	10
3.1	Základní princip měření průtoků chemickou metodou	10
3.2	Kontinuální injektáž stopovače	10
3.3	Jednorázová injektáž stopovače	11
3.4	Stopovače	11
3.5	Množství soli	12
3.6	Charakteristika chování injektované soli v korytě	12
3.7	Vzdálenost místa injektáže od místa měření konduktivity	13
3.8	Umístění konduktometrů	15
3.9	Kalibrace	15
3.10	Průběh měření	16
3.11	Výpočet průtoku z dat naměřených konduktometrem	16
3.12	Typy chyb vedoucí k nesprávnosti výsledku	17
3.13	Vliv soli na ekosystém v okolí toku	19
4	Terénní práce	20
4.1	Lokality	20
4.2	Průběh měření	22
4.2.1	Kalibrace konduktometrů	23
5	Zpracování dat a výsledky	27
5.1	Zpracování dat	27
5.1.1	Odečtení pozadí	27
5.2	Výsledky	29
6	Diskuse	33

7 Závěr	35
Seznam použité literatury	36
Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	43

1. Úvod

Data o průtoku jsou důležitá pro plánování a distribuci vody pro zemědělství, průmysl a zásobování měst. Jeden z klíčových aspektů měření průtoku je prevence povodňových událostí (Ercolani a Castelli, 2017). Data o průtoku umožňují včasné varování, které může minimalizovat škody jak na majetku, tak na životech.

Hodnota průtoku je třeba v několika sférách. Vodoprávní úřad potřebuje znát hodnotu průtoku pro schvalování množství odběru vody zemědělci. Množství odebrané vody stanovuje směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2000/60/ES ze dne 23. října 2000. Pro ekologii je potřeba znát hodnotu průtoku, z důvodu reakce druhů na změnu odtokových režimů. Studie (Poff a Zimmerman, 2010) se zabývá změnou populací ryb a vegetace v okolí toku v důsledku změn průtoku v korytě. V oblasti energetiky je potřeba znát hodnotu průtoku pro efektivní využití vodní energie (Adamkowski a kol., 2019) a zefektivnění produkce elektřiny.

Metoda měření průtoku chemickou metodou s použitím soli je nejčastěji používanou metodou v otevřených korytech, zejména v odlehlých horských tocích nebo hůře dostupných místech, kde je obtížné kvalitně vytvořit hydrologický profil nebo změřit aktuální průtok (Comina a kol., 2013). Průtok je vyhodnocen z přepočtu naměřené konduktivity na koncentraci z regresní přímky kalibrační rovnice. Při správném měření může být odchylka vyhodnoceného průtoku $\pm 5\%$ (Day, 1976).

V první části práce jsou popsány hlavní metody k zjištění průtoku korytem. Metody mají různé nároky na přístrojové vybavení, kolik osob je potřeba k měření, charakter toku, na kterém bude měření probíhat, doba, jakou měření trvat apod. Tyto rozdíly jsou v jednotlivých kapitolách popsány. Hlavní část práce se věnuje měření průtoku chemickou metodou, kdy je k zjištění průtoku použita sůl.

V druhé části jsou zdokumentovány terénní části práce, kdy byl měřen průtok na řece Loděnici mezi obcemi Sedlec a Jánská. V této části jsou důkladně popsány lokality, průběh měření a vyhodnocování výsledků. V diskusní části práce se psáno o možných vzniklých chybách během měření a srovnání výsledků s vodočtem a FlowTrackerem.

2. Přehled metod měření průtoku

2.1 Rychlostní metody

Hlavní myšlenka rychlostních metod měření průtoku vychází z předpokladu, že stačí přístrojem měřit rychlost proudění vody v několika bodech. Při změření plochy průtočného profilu, který je rozdělen podél svislic na podsekce, vychází výpočet průtoku podle vztahu ([Pantelakis a kol., 2022](#)):

$$Q = \sum_{i=1}^N v_i A_i,$$

kde N je počet podsekcí, A_i je plocha každé podsekce a v_i je rychlost proudění v každé podsekci.

2.1.1 Hydrometrická vrtule

Hydrometrická vrtule je přístroj, navržený v roce 1787 německým hydroinženýrem Reinhardem Woltmanem ([VÚV, 2023](#)). V průběhu času se vzhled a tvar vrtule měnil. Vrtuli podobnou té dnešní patentoval roku 1885 americký inženýr W. G. Price. Oproti staré evropské verzi měla tato nová svislou osu a velmi se podobala dnešnímu anemometru.

Měření hydrometrickou vrtulí je jeden z nejpoužívanějších způsobů měření průtoku v korytě. Principů fungování je více. Kromě klasické vrtule existují měřidla indukční ([Svozilíková Krakovská a kol., 2017](#)), nejnověji se objevují i měřidla ultrazvuková. Nejběžnější je způsob registrování počtu otáček vrtule v čase.

Měření začíná napnutím měřícího pásma a podle šířky profilu je určen počet svislic. Počet svislic je uveden v tabulce 2.1. Na každé svislici je prováděno měření, kdy proudící voda roztáčí vrtulku, která vykoná určitý počet otáček v čase. Rychlost proudění se vypočítá ze vztahu

$$v_p = \alpha + \beta n,$$

kde v_p je rychlost proudu, n je počet otáček a α a β jsou kalibrační konstanty.

Podle hloubky toku je nutné provést určitý počet měření na každé svislici. Do hloubky toku 0,5 m se provádí jednobodová metoda, kdy vrtulka měří v hloubce 40 % ode dna. V rozmezí mezi 0,25 m a 0,5 m se provádí dvoubodová metoda, kdy je měření prováděno v 20% a 80% hloubky toku. Při hloubce větší než je půl metru se provádí třibodová metoda, která odpovídá měření ve 20%, 40% a 80% hloubky toku ([Boiten, 2003](#)).

Následující rovnice ukazují vztahy pro jednotlivé varianty:

$$v_p = v_{0,4},$$

$$v_p = \frac{v_{0,2} + v_{0,8}}{2},$$

$$v_p = \frac{v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}}{4}.$$

Při měření jednobodovou metodou je rychlost hydrometrickou vrtulí měřená ve 40% hloubky ode dna z důvodu, že se střední svislicová rychlost nachází právě v této hloubce (Boiten, 2003). Herschy (2008) udává, že měření ve 40% hloubky ode dna je vhodné pro minimalizování efektů turbulence.

Metodu hydrometrické vrtule lze použít na ne příliš mělkých tocích, kde koryto řeky meandruje co nejméně a je ideálně úplně bez vegetace. Výhodou metody je jednoduché pořizování velmi kvalitních výsledků, ke kterému stačí jedna pověřená osoba, avšak kolega se při měření hodí na k rychlejšímu zapisování výsledků. Nevýhodou metody je vysoká cena vrtule a také fakt, že vrtule je křehký nástroj, jenž se snadno zničí. Nutná je častá kalibrace, která se provádí ve speciálních bazénech v České kalibrační stanici vodoměrných vrtulí při Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v Praze (VÚV, 2023).

Tabulka 2.1: Minimální počty svislic podle normy (ISO/TR 11656, 1993).

Šířka toku (m)	Počet svislic
pod 0,5	5–6
0,5–1,0	6–7
1–3	7–12
3–5	13–16
více než 5	alespoň 22

2.1.2 Plováková metoda

Metoda využití plováku vychází z předpokladu, že je předmět (nejčastěji plovák k tomu určený) unášen proudem vody stejnou rychlostí. Metoda se využívá jak k měření průtoku středních a větších říček, tak i k měření v člověkem vytvořených betonových náhonech. Plováková metoda se dá dobře využít a dříve využívala při povodňových stavech (Kemel a Kolář, 1980), dnes se v těchto situacích používá ADCP (Gunawan a kol., 2010).

Existuje několik typů plováků, přičemž mezi základní řadíme tyčový, hladinový a dvojitý (Boiten, 2003). Jako tyčový se využívá neprázdná láhev vody (vody má být v lahvi tolik, aby plovák nebyl ovlivněn vanutím větru, ale záro-

veň tak nad hladinou, aby byl stále vidět), nebo kus dřeva. I přesto, že měření průtoku plovákem má řadu výhod, např. jednoduchost a téměř žádná nutnost vybavení, je nutné dodržet řadu podmínek k dosažení dobrých výsledků. Pro měření musí být vybrán rovný úsek toku, rychlost musí být v profilu toku přibližně konstantní, tok nesmí vykazovat boční, spodní nebo turbulentní proudy (Černoch, 1977).

Na měrném úseku se určí tři měrné profily, počáteční, středový a koncový. Tyto profily jsou kolmé na směr proudění. Měrný úsek musí být minimálně dvakrát až pětkrát delší než je šířka toku v měřeném místě (Svozilíková Krakovská a kol., 2017). Pověřená osoba měří čas proplutí mezi prvním a třetím bodem. Plovák se do vody vypouští 5–10 metrů před prvním (počátečním) bodem (Kemel a Kolář, 1980) a jedno měření by mělo trvat alespoň dvacet sekund (ISO/TR 11656, 1993).

Pro výpočet rychlosti plováku platí vztah (Boiten, 2003)

$$v_{pl} = \frac{L}{t},$$

kde v_{pl} rychlost plováku, L je vzdálenost mezi počátečním a koncovým bodem a t doba trvání měření.

2.1.3 ADCP

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) je moderní přístroj, jehož fungování je založeno na Dopplerově jevu. Jedná se o skládání rychlostí vlnění s rychlostí vzájemného pohybu zdroje a přijímače. Na stejném principu je založen i přístroj FlowTracker (podkap. 2.1.4), tzn. pomocí Dopplerova jevu je měřena rychlost pohybu suspendovaných částic ve vodě. První přístroje podobného typu dnešního ADCP se začaly využívat před půl stoletím, avšak bylo potřeba minimální hloubky 3–4 metrů a byly tedy využívány pro měření průtoků v deltách a estuáriích. V průběhu 90. let různí výrobci vylepšili design a výkon akustických Dopplerových profilerů. Profily, které byly velké a těžké (až 1 m na délku a vážící více než 20 kg), byly upraveny do kompaktních a lehkých jednotek o délce 14 cm a hmotnosti 7 kg (Yorke a Oberg, 2002b). Podle (Meteorological a Institute, 2023) by představení technologie ADCP mohlo zvýšit počet bodů dat pro každé měření až 30krát ve srovnání s klasickými metodami.

Tři nejdůležitější součásti měření jsou plavidlo, transduktor a přenosný počítač. Jako plavidlo se nejběžněji používá člun. Ten může pohánět motor na dálkové ovládání, nebo lze člun přetáhnout přes řeku pomocí lana (De Doncker a kol., 2008). Lze použít systému připojení lana z každého břehu nebo, spouštění přístroje na laně z mostu. Použití na velké řece vyžaduje, aby bylo plavidlo ADCP zavěšeno z montážního držáku na lodi s vlastním pohonem.

Princip měření spočívá v rozdělení vodního profilu na dílčí buňky. Přístroj vysílá akustické impulsy podél tří nebo čtyř paprsků s konstantní frekvencí mezi 75 a 3000 kHz. Paprsky jsou umístěny v přesných horizontálních úhlech od sebe, 120° u třípaprskových přístrojů a 90° u přístrojů čtyřpaprskových. Po vyslání impulsů se zvukové vlny odrazí od částic ve vodě, jako jsou bubliny, suspendovaný sediment nebo plankton. Protože se částice pohybují proudem vody, může se rychlost odražených vln lišit od rychlosti vln vyslaných. Pokud se částice pohybují směrem k ADCP, frekvence odražených vln je vyšší (zvýšená frekvence). Naopak, pokud se částice pohybují od ADCP, frekvence odražených vln je nižší (snížená frekvence). ADCP vyhodnocuje rozdíly mezi frekvencí vyslaných a odražených vln, z čehož pak poskytuje rychlosti vodních částic. Na základě těchto dat lze určit rychlost proudu vody v různých hloubkách a místech vodního toku nebo oceánu. Akustický Dopplerův profiler používá Dopplerův jev k výpočtu složky rychlosti vody podél každého paprsku a systémový software vypočítává rychlost vody ve třech rozměrech pomocí trigonometrických vztahů. Samotné měření s pomocí člunu na laně, které je nejčastější pro jeho jednoduchost, funguje tak, že člun se pohybuje z jednoho břehu na druhý v předem zvoleném průřezu. Naměřené rychlosti zahrnují jak skutečnou rychlost proudění, tak i rychlost pohybujícího se člunu. Jedno měření z jednoho břehu na druhý se nazývá transekt. Při normálním vodním stavu je nutné udělat takovéto transkety dva až čtyři. [Yorke a Oberg \(2002a\)](#) píše, že při stavu povodňovém stačí jeden.

ADCP mají určitá omezení pro měření průtoku v průřezu řeky, protože nemohou měřit rychlosti vody v blízkosti vodní hladiny, dna nebo břehů řeky. Rychlosti vody v blízkosti hladiny se neměří z důvodu ponoru snímače (hloubka čela snímače pod hladinou vody) a zatemňovací vzdálenosti přístroje. Zatemňovací vzdálenost je označení pro hloubku, do které dokáže signál zvukových vln proniknout a odrazit se zpět k přijímačům na zařízení. Ta je zpravidla 0,25 m.

ADCP mají různé využití v různých odvětvích hydrologie. Jedním příkladem je studie [Imamura a kol. \(2021\)](#), která zkoumala možnost obnovy energie z proudu Kuroshino v severním Tichém oceánu mimo východní pobřeží Japonska. Technologie ADCP byla použita společně s simulacemi, aby bylo možné získat vědecký odhad účinnosti obnovy energie. Technologie byla též použita ve výzkumu [Boghdady a kol. \(2021\)](#) k zkoumání morfologických změn říčního dna na Nilu v důsledku tokových vzorců. Pomocí technologie ADCP je možné mapovat morfolologii říčního dna.

Mezi výhody využití ADCP patří schopnost měřit průtok i při povodňových stavech, kdy je užití jiných metod neproveditelné nebo nebezpečné. Dále

se při použití popsané metody dobereme přesných výsledků i za již zmíněného povodňového stavu. Nevýhodou je pořizovací cena a nutnost přítomnosti proškoleného operátora. U oceánského využívání ADCP, kdy je transduktor ponořen na dno, může docházet k narušování echolokace kytovců. Míra narušování závisí na frekvenčním rozsahu ([The Encyclopedia of Earth, 2022](#)).

2.1.4 FlowTracker

Měření FlowTrackerem je založeno na Dopplerově jevu. FlowTracker pracuje při akustické frekvenci 10 MHz a měří fázovou změnu způsobenou Dopplerovým posunem akustické frekvence, ke kterému dochází, když se přenášený akustický signál odráží od částic unášených proudem, přičemž se předpokládá, že uvedený materiál je unášen rychlostí vody v korytě ([Rehmel, 2006](#)). Tento jev byl popsán Christianem Dopplerem roku 1842 ([Huang a kol., 2023](#)). Velikost změny fáze je úměrná rychlosti proudění. Fázový rozdíl může být kladný nebo záporný, což umožňuje měřit FlowTrackeru pozitivní a negativní rychlosti. FlowTracker měří rychlost s frekvencí 10 Hz (tj. desetkrát za sekundu), zprůměruje data (počet měření pro průměr lze zvolit) a zaznamenává každou sekundu data vektoru rychlosti ([SonTek, 2007](#)). Podle výrobce lze použít i v mělkých hloubkách 3 cm a v rychlostech v rozsahu 0,1 až 450 cm/s s přesností ± 1 % naměřené rychlosti ([Rehmel, 2006](#)). Na trhu je od roku 2018 dostupná již druhá generace ([Oberger a Mueller, 2007](#)).

FlowTracker se skládá z následujících částí: výpočetní přístroj, sonda (přijímač, vysílač, akustický senzor), tyč a kabel propojující sondu s výpočetním zařízením. Podle počtu přijímačů (dva nebo tři) rozlišujeme 2D a 3D sondy. 2D sondy pracují pouze s pohybem vodní masy v horizontální rovině, zatímco 3D sondy využívají k směrům horizontálnímu i směr vertikální.

Pro měření FlowTrackerem je nutné určit počet svislic podle stejné tabulky jako pro hydrometrickou vrtuli (tab. 2.1). Podle hloubky je nutno využít jednobodovou, dvoubodovou a nebo třibodovou metodu, stejně jako při použití hydrometrické vrtule.

U toků, jejichž šířka je menší než 10 metrů, se měří na každém metru. U toku s větší šířkou měříme na každém druhém metru. Poté, co je FlowTracker umístěn při hladině vody, začne měřit rychlost proudu na základě Dopplerova jevu. Přístroj vysílá ultrazvukové signály směrem ke dnu toku a zachycuje odražené signály od suspendovaných částic ve vodě. FlowTracker shromažďuje data o rychlosti proudu na základě Dopplerova jevu a zaznamenává je. Data lze buď zobrazit na displeji FlowTrackeru nebo uložit pro pozdější analýzu v počítači. Výhodou práce s FlowTrackerem je upozornění operátora na chybné měření a po ukončení měření FlowTracker vyhodnotí hodnotu nejistoty. Tato hodnota je

udávána v procentech.

Rychlost proudu vody počítá FlowTracker ze vztahu

$$v = \frac{f v_r}{f' - f},$$

kde v je rychlost zvuku ve vodě, f je frekvence vyslaného ultrazvukového signálu, f' je frekvence odraženého signálu částic ve vodě a v_r je rychlost proudu vody ve směru odraženého signálu (Oberg a Mueller, 2007).

Jelikož výhod FlowTrackeru je víc než nevýhod, začnu právě jeho nevýhodami. Oproti hydrometrické vrtuli je to drahý přístroj. Druhou nevýhodou FlowTrackeru je, že oproti hydrometrické vrtuli je měření závislé na čistotě vod. Přístroj nebude dobře fungovat v situaci, kdy ve vodě není suspendovaný sediment (Morlock a Fisher, 2004). Výhodou práce s FlowTrackerem je upozornění operátora na chybné měření a po ukončení měření FlowTracker vyhodnotí hodnotu nejistoty. Tato hodnota je udávána v procentech. FlowTracker je přístroj, který od hydrometrické vrtule není závislý na rychlosti proudění vody korytem (při malé rychlosti se vrtulka nemusí roztočit). FlowTracker není nutné kalibrovat. Kalibrace je nutná pouze v případě neopatrného zacházení a následného poškození sondy (Morlock a Fisher, 2004). Operátor je schopen dosáhnout kvalitních výsledků úplně sám. Není potřeba dalšího kolegy na zapisování výsledků.

2.2 Chemická metoda

Chemická metoda je metoda používající se od 2. poloviny 19. století (Boiten, 2003). Základním principem měření chemickou metodou pomocí stopovačů je přidání známého množství stopovače do proudu a sledování jeho koncentrace v proudu v bodě, kde je plně smíchán s proudem. Čím vyšší je průtok, tím více ředí stopovač. Stopovače jsou rozděleny do několika skupin. Fluorescenční, u kterých se množství dá zjistit pomocí emitovaného světla, radioaktivní, u kterých dochází při stopovacích zkouškách k rozpadu, a chemické. Z chemických se nejběžněji používá kuchyňská sůl pro její snadnou dostupnost a snadnou a bezpečnou manipulaci. Injektovat stopovač do toku je možno buď kontinuálně nebo jednorázově. Metoda je často používána na menších tocích s turbuletním prouděním, pro lepší míchání stopovače (Shaw, 1994). Podrobněji je tato metoda rozebrána v kapitole 3.

2.3 Objemová metoda

Objemová metoda se využívá v místech, kde je tok upraven tak, že je vodu vůbec možné zachytit. Princip měření spočívá v měření času naplnění nádoby o známém objemu. Pro spolehlivé a přesné výsledky musí být průtok měřen

alespoň pětkrát (Dobriyal a kol., 2017), podle Kemel a Kolář (1980) stačí měření opakovat pouze třikrát. Měření je možné provádět ručně, nebo za využití automatických odměrných nádob, které se po naplnění sklopí a vylejí.

2.4 Metoda výpočtu průtoku ze známého průřezu koryta toku

Pro výpočet průtoku metodou, kdy známe průřez koryta, je nezbytně nutné vybrat vhodnou lokalitu. Taková vhodná lokalita splňuje tři základní kritéria:

- a) koryto by mělo být bez překážek způsobujících zpětné proudění,
- b) konstantní sklon toku,
- c) úsek by měl být přímý.

K zjištění správného výsledku se využívá veličin, které popisují proudění vody korytem. Jde o sklon hladiny, hydraulický poloměr a podle užitého vztahu Chézyho rychlostní součinitel, nebo Manningův koeficient drsnosti.

Sklon hladiny je bezrozměrná veličina udávající poměr mezi rozdílem nadmořských výšek počátečního a koncového bodu měřeného úseku a vzdáleností těchto bodů. Různé zdroje udávají různé odhady pro optimální vzdálenost bodů v závislosti na šířce koryta. Např. Kemel a Kolář (1980) udávají, že vzdálenost bodů by měla být šestkrát až desetkrát větší než šířka toku.

Hydraulický poloměr je poměr průtočné plochy ku omočenému obvodu průtočného profilu (Kemel a Kolář, 1980). Tento poloměr je aritmetickým průměrem tří hodnot (počáteční, středové a koncové), přičemž středová hodnota hydraulického poloměru je započítána dvakrát (má dvojnásobnou váhu).

Chézyho rychlostní součinitel (též Chézyho koeficient) C je hydraulický parametr používaný k popisu toku vody v řekách nebo otevřených kanálech (Henderson, 1966). Je pojmenován podle francouzského inženýra Antoina de Chézy a vyjadřuje vztah mezi hydraulickým poloměrem R a střední rychlostí vody v_s . Jednoduše platí přímá úměra mezi Chézyho koeficientem a rychlostí toku (French, 1985)

$$v_s = C\sqrt{RI}.$$

Manningův koeficient drsnosti n je hydraulický parametr popisující, po jak drsném povrchu protéká voda korytem. Byl vyvinut irským inženýrem Manningem v 19. století. Hodnota koeficientu se liší podle různých povrchů toků a tyto hodnoty se získávají experimentálně. Je ovlivněn několika faktory, jako je materiál dna, hloubky, sklonu toku, nebo říční vegetací, která se v průběhu roku mění. Podle materiálu dna Manningův koeficient nabývá hodnot 0,026–0,070 na základě tabulky Coona (1998), česky v Mattas (2014). Manningova

rovnice pro střední rychlost má tvar

$$v_s = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}.$$

3. Chemická metoda

3.1 Základní princip měření průtoků chemickou metodou

Základním principem měření chemickou metodou pomocí stopovačů je přidání známého množství stopovače do proudu a sledování jeho koncentrace v proudu v bodě, kde je plně smíchán s proudem. Čím vyšší je průtok, tím více ředí stopovač. Ten je možno injektovat buď jednorázově, nebo kontinuálně (viz podkap. 3.2). Při používání soli jako stopovače je možnost nepromíchat sůl s vodou před injektáží, avšak sůl musí být injikována v místě, kde se rychle rozpouští. Vznikne tak solný roztok in situ, který se následně rozptýlí do proudu za pomoci turbulence ve vodním sloupci (Moore a kol., 2004). Výsledná koncentrace soli se měří jako elektrická vodivost v bodě po proudu od místa vstříkování, kde je zcela promíchána. Vzdálenost mezi místem injektáže a měřicím bodem (místo kde se nachází konduktometr) se označuje jako délka míchání.

3.2 Kontinuální injektáž stopovače

Rozdíl mezi variantami spočívá v délce injektování stopovače do toku. Během varianty s kontinuální injektáží je známé množství stopovače nepřetržitě dodáváno do toku. Po určité době je koncentrace stopovače vyrovnána. Dosáhne se tedy ustáleného stavu, zatímco u jednorázové injektáže je cíl počkat, až se konduktivita vrátí na svou přirozenou hodnotu. Pomocí jednoduché směšovací rovnice se pak dá spočítat průtok (Smith, 2023)

$$Q = q \frac{c - c_2}{c_2 - c_1},$$

kde Q je průtok toku, q je průtok injektovaného stopovače, c je koncentrace stopovače v nalévaném roztoku, c_1 je změřená koncentrace v toku před injektáží a c_2 je ustálená koncentrace v toku během injektáže.

Podobně jako u jednorázové injektáže je koncentrace stopovače monitorována ve vodě podél toku pomocí sond v pravidelných intervalech.

V situaci, kdy je již požadovaná koncentrace toku velká a je nutno použít silně koncentrovaný roztok s velkou hustotou, může být roztok vlivem gravitace zanesen do dnového sedimentu, což ovlivňuje délku a přesnost měření (Juráček, 2002). Výhodné je použít takové stopovače, které mají nízkou požadovou hodnotu v toku a jejich limit detekce je též nízký, např. fluorescenční stopovače (Kopáč, 2007).

Tato varianta je obzvláště užitečná při měření průtoků ve velkých řekách nebo vodních tocích s proměnlivým průtokem. Metoda kontinuálního přidávání stopovače je jednou z pokročilejších metod měření průtoků vody, která

vyžaduje odborné znalosti pro správné použití a vybavení pro injektáž konstantního množství stopovače, jako např. Mariottova láhev.

3.3 Jednorázová injektáž stopovače

Jednorázová injektáž stopovače spočívá v okamžitém nálevu, nebo nasypání stopovače do toku a sledování jeho průchodu přes čidlo v místě měření. Cílem je získat záznam koncentrace stopovače v čase. Jedno měření končí poté, co se koncentrace stopovače ustálí zpátky na původní hodnotě.

Průtok Q se vypočítá pomocí vztahu

$$Q = \frac{M}{A}, \quad (3.1)$$

kde M je hmotnost soli a A je plocha pod křivkou koncentrace v čase.

Dobrý výsledek je závislý na vybrání vhodného úseku toku. Na vhodném úseku dochází k turbulentnímu proudění a tedy dobrému promíchávání stopovače s vodou z vodoteče. Zúžování koryta a časté překážky na dráze promíchávání podporují. Rovné toky s hladkým dnem a bez překážek v korytě nezajišťují kvůli laminárnímu režimu proudění dobré promíchání a dochází tedy ke zkreslování výsledků. Toky s místy, kde jsou zpětné proudy (voda v nich není součástí hlavního proudu), také nejsou vhodné – dochází ke ztrátám stopovače, což opět vede ke špatným výsledkům. Také materiál dna ovlivňuje výsledek měření. Norma (ISO 9555-1, 1994) varuje před měřením na šterkovém propustném dně, na kterém dochází ke ztrátám stopovače.

3.4 Stopovače

Stopovače jsou látky používané k určení směru a rychlosti pohybu podzemní, ale i povrchové vody. Je tedy nutné, aby stopovač byl rozpustný, či dobře mísitelný s vodou a jeho přidání neměnilo výrazně vlastnosti vody, do které byl stopovač přidán.

Stopovače dělíme na umělé a přirozené. Umělé stopovače dáváme do vody z důvodu provedení stopovací zkoušky, zato stopovače přirozené se v systému objevují přirozeně. Stopovače dělíme též do tří kategorií. Fluorescenční stopovače jsou díky jevu zvaném fluorescence schopny emitovat světlo. Nejběžnější fluorescenční stopovač je fluorescein, který lze zachytit i při koncentraci 2 ng/l (Käss a kol., 1998). Druhou kategorií stopovačů jsou radioaktivní stopovače. Ty se během transportu rozpadají a jejich přítomnost je možné detekovat při malých koncentracích (Barbieri, 2019). Na manipulaci s radioaktivními stopovači je potřeba pověřené osoby s oprávněním nakládat s radioaktivním materiálem. Třetí kategorií stopovačů jsou stopovače chemické, ke kterým řadíme hlavně soli. Především chloridy (NaCl), jodidy (NaI), lithium (LiCl). Stopovače jsou

podrobně rozebrané v normě [ISO 9555-3 \(1992\)](#).

Jelikož se tato bakalářská práce věnuje využitím soli jako stopovače, budu se dále zabývat pouze solí.

3.5 Množství soli

K dosažení správných výsledků hraje množství soli svou důležitou roli. Mezi faktory ovlivňující množství rozmíchané a následně injektované soli patří: rychlost proudu, doba měření, velikost průtoku a peaku konduktivity následně přepočítaného na koncentraci soli ([Kilpatrick a kol., 1985](#)).

Malé množství rozpuštěné soli nevytváří velký peak, z čehož plyne, že graf konduktivity bude nízký a krátký s malou plochou pod křivkou. Taková situace není problém, ale v případě, že se do sondy dostane bublinka a konduktivita bude mít rychlé skoky v hodnotách, dochází ke komplikacím ve vyhodnocování a možností vzniknutí větší chyby. Někdy dochází, že při injektování malého množství stopovače nastává dosažení požadové koncentrace dlouho po dosažení maximální koncentrace.

Při opačné situaci, že bylo v nádobě určené k injektáži rozpuštěno soli příliš moc, dochází ke skokům v hodnotách při zaznamenávání navyšování koncentrace při příchodu roztoku ke konduktometrům. V případě, že je přístroj nastaven tak, že zaznamenává hodnoty v krátkých časových intervalech, nedochází ke zkreslování výsledků ([Juraschek, 2002](#)). Dále Juraschek tvrdí, že rozdíl mezi požadovou a nejvyšší naměřenou konduktivitou by měl dosahovat přinejmenším 20–30 % požadové konduktivity. V případě, že dojde k rozpuštění většího množství soli, je chyba znatelně menší, než když je rozpuštěno množství menší. Při průtoku $1 \text{ m}^3/\text{s}$ je doporučeno rozpustit množství přibližně 10 kg ([Käss a kol., 1998](#)). Při polovičním průtoku, který je rozhodující faktor pro množství rozpouštěné soli, je vhodné použít více než 5 kg soli. Vztah mezi průtokem a množstvím soli tedy není lineární ([Kilpatrick a kol., 1985](#)). Toto množství soli je vhodné použít v turbulentních tocích, kde dochází k silnému promíchávání.

3.6 Charakteristika chování injektované soli v korytě

Rozpuštění soli ve vodě vyžaduje čas, přičemž rychlost rozpouštění je úměrná teplotě vody (tj. sůl se rychleji rozpouští v teplé než studené vodě) a nepřímo úměrná požadové koncentraci soli (tj. sůl se rozpouští pomaleji, čím větší množství soli ve vodě bylo před injektáží). Toto chování při rozpouštění lze snadno pozorovat: sůl vhozená do sklenice studené vody se bude pomalu rozpouštět, protože voda obklopující zrna má vysokou koncentraci a nemá tendenci se mísit s vodou nad ní. Po zamíchání se však sůl okamžitě rozpustí. Sama teplota hraje silnou roli v rozpouštění soli. Tento jev je způsoben tím, že zvýšením teploty se zvyšuje kinetická energie molekul, tj. zvyšuje se rychlost jejich pohybu.

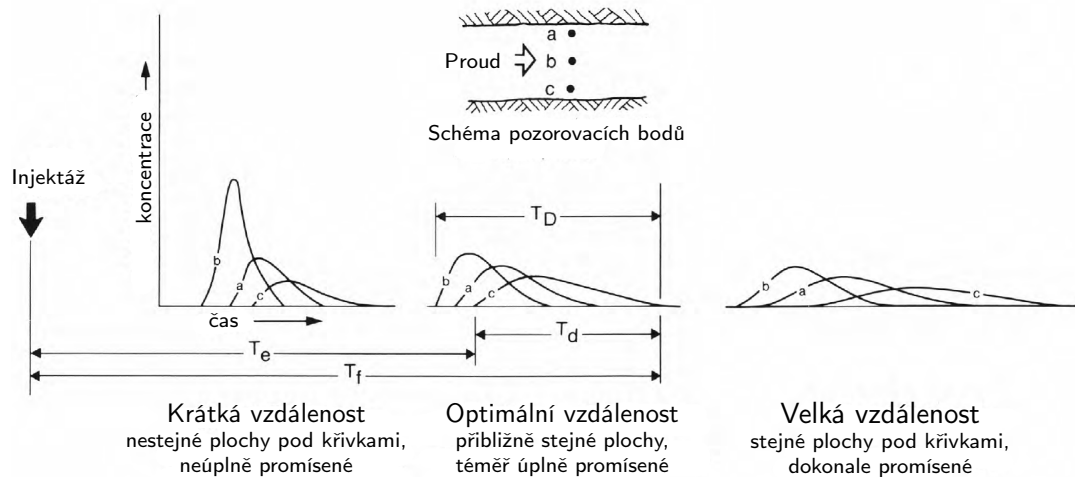
To vede k usnadnění oddělování iontů soli a jejich rozpouštění v molekulách vody (Christov a Balarew, 1995).

Stopovač se ve vodě šíří několika způsoby: advekcí, molekulovou difúzí a disperzí. Advekce je proces, při němž jsou různé látky jako soli, živiny nebo znečištění transportovány proudem vody. Díky advekci je možné modelovat proudění vody (Kirchner a kol., 2001) a je nezbytná pro ekosystém, protože zajišťuje přísun živin a dalších potřebných látek. Dále je disperze (tj. rozptyl). V hydrologii se disperze nebo rozptyl nazývá jev, kdy se molekuly vody pohybují vodním tokem nebo prouděním kapaliny nepravidelným způsobem. Disperze způsobuje, že látky se rozptylují, směsují a rozšiřují ve vodním toku, místo aby se pohybovaly lineárně podél hlavního proudu. Ta je ovlivňována různými rychlostmi proudění na různých místech, způsobeného turbulencí a nerovnostmi dna. Důsledkem disperze je rozšiřování látek nesouhlasně s procesem samotné advekce (Pitter, 2009). Disperzi dělíme na příčnou a podélnou, dále na příčnou horizontální a příčnou vertikální. Stopovač se jednodušeji promíchává vertikálně, protože tok je častěji širší než hlubší a promíchávání napříč vodním profilem není stejnoměrné. Molekulová difúze, jakožto třetí způsob, je pronikávní molekul jedné látky do druhé se snahou prostoupení do celého objemu. Díky molekulové difúzi se ionty soli šíří z oblastí s vyšší koncentrací soli do oblastí s nižší koncentrací soli. Difuzní rychlost soli závisí na několika faktorech, jako je gradient koncentrace soli, teplota vody a viskozita vody. Obecně platí, že vysoké rozdíly v koncentracích a vyšší teploty zvyšují rychlost difúze soli. Tento jev je významný při řadě procesů, jako je rozpouštění soli ve vodě, šíření soli v půdě, filtrace soli při průchodu vodním tokem nebo vodou nasycenou půdou (Grathwohl, 2012). Molekulární difúze je základním mechanismem, který zajišťuje rovnoměrné rozptýlení soli ve vodě a umožňuje tak chemické reakce, transport živin a další důležité procesy ve vodním prostředí (Whitaker, 1967). V tekoucí vodě je ale molekulová difúze prakticky bezvýznamná.

Vliv disperze a difúze jde od sebe pouze těžko rozpoznat (Valocchi a Roberts, 1993).

3.7 Vzdálenost místa injeckáže od místa měření konduktivity

Existuje mnoho vzorců pro výpočet dráhy, kterou musí stopovač urazit, aby došlo k získání dobrých výsledků (ISO 9555-3, 1992). Jak již bylo zmíněno, podmínkou je taková dráha, aby byl stopovač dostatečně promíchán. Norma ISO 9555-1 (1994) zavádí stupeň míšení X , který je udáván v procentech a spočítá



Obrázek 3.1: Vliv vzdálenosti měření na křivky koncentrace. Převzato a upraveno z (Kilpatrick a Cobb, 1984).

se podle vzorce

$$X = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |A_i - \bar{A}|}{2N\bar{A}} \right),$$

kde i je index sekce v rámci příčného profilu, N je počet sekcí příčného profilu,

$$A_i = \int_{t_a}^{t_a+T_r} c_{2i}(t) dt$$

je plocha pod křivkou koncentrace c_{2i} v dané sekci, t_a je čas příchodu stopovače do místa měření, T_r je doba průchodu stopovače a

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$$

je aritmetický průměr ploch A_i .

Podle uvedených vzorců je patrné, že se stupeň míšení zvyšuje s časem a tedy i dráhou, kterou stopovač urazí. Podle normy ISO 9555-1 (1994) by měl být stupeň míšení větší než 90%. Zvýšit procentuální hodnotu je možné prodloužením dráhy stopovače. Rozdíly v peaku mezi neúplně a dokonale promíšeným stopovačem jsou na obr. 3.1

Juraschek (2002) píše, že nejsou žádná ustálená pravidla pro vzdálenost sond od místa injektáže.

3.8 Umístění konduktometrů

Dalším rozhodujícím faktorem je samotná pozice konduktometrů. I přesto, že v rámci příčného profilu stačí konduktometr jeden, využívá se jich při terénním měření na různých pozicích více [Bruthans \(2006\)](#). Výsledný průtok se v rámci více sond na příčném profilu může lišit. Tento jev často nastává, když je jeden konduktometr vložen do proudnice s rychlejším prouděním, zatímco druhý měří v pomalejším proudu.

Sonda konduktometru by neměla ležet přímo na dně, protože spodní vrstva vody v korytě není součástí hlavního toku. Proto [Juraschek \(2002\)](#) doporučuje upevnit sondy minimálně do 20 % hloubky nad dno.

Norma [ISO 9555-3 \(1992\)](#) varuje před měřením konduktivity v místě se silným turbulentním prouděním, z důvodu možnosti vytvoření bublinky uvnitř sondy. Bublinka přerušuje měření konduktivity a opět dochází ke zkreslování výsledků. Tento jev lze z naměřených hodnot zjistit i před injektáží. Bublinka uvnitř sondy se projevuje rychlým kolísáním konduktivity.

3.9 Kalibrace

Kalibrace je proces, při kterém se určí vztah mezi naměřenou konduktivitou a koncentrací soli. Kalibrace je důležitý a nezbytný krok k získání hodnoty průtoku. Ve většině případů se provádí na místě experimentu, avšak dá se provést i posléze v laboratoři.

Postup kalibrace je jednoduchý. Odebranému množství vody z koryta se v nádobě zjistí konduktometrem vodivost. Tuto vodivost nazýváme požadová. Do nádoby se známým objemem vody z toku přidáme přesně změřené množství soli, zpravidla v podobě koncentrovaného roztoku („kalibrační roztok“), důkladně zamícháme a měříme konduktivitu, nejlépe několikrát. Tento proces opakujeme pro několik takto připravených roztoků o různých koncentracích přidané soli. Konduktivita se s vyšší koncentrací zvyšuje, jejich vzájemný vztah vyneseme do grafu a výsledkem je tzv. kalibrační křivka, která ukazuje vztah mezi veličinami pro daný měřicí přístroj. Vztah je pro malé koncentrace soli ve výsledném roztoku lineární, podle [Jurascheka \(2002\)](#) jde o vztah kvazilineární. Norma ([ISO/TR 11656, 1993](#)) udává linearitu kalibrační křivky do hodnoty 5,8 g/l. Na základě laboratorních zkoušek bylo zjištěno, že kalibrace by měla být prováděna co nejbliže aktuální teplotě toku, aby se minimalizovaly chyby ([Richardson a kol., 2017](#)).

Při kalibrování je vhodné měřit alespoň v rozsahu takových hodnot, kterých potom dosáhne konduktometr v průběhu samotného experimentu. Čím menší je rozptyl hodnot koncentrace, tím je kalibrační křivka blíže přímce a nerovnost křivky můžeme zanedbat. [Juraschek \(2002\)](#) zavádí vzorec pro výpočet rozdílu

mezi pozadřovou konduktivitou a nejvyšší konduktivitou řhem měření.

$$\sigma_{max} - \sigma_p = \frac{bM}{Q_o},$$

kde σ_{max} je největší naměřená konduktivita, σ_p pozadřová konduktivita, M je množství stopovače, Q_o je odhadnutý průtok a b je konstanta, která má hodnotu 10 pro turbulentní tok a 20 pro laminární tok.

3.10 Průběh měření

Mezi výhody metody, kdy využíváme sůl jako stopovač, kterému měříme konduktivitu v řase, patří malé množství vybavení. Operátor k měření potřebuje pouze řesně navážené množství soli, kalibrační roztok, nádobu na smířání soli s řiční vodou a konduktometr. Řesně zvážené množství soli je v nádobě rozpuřtěno ve vodě z vodoteče a na vhodném místě je injektováno do koryta. Množství roztoku injektovaného po profilu toku by mělo být uměrné pro každou proudnici koryta (Bruthans, 2006). To znamená, že v proudnici, kde proudí větší množství vody, by mělo být nalito větší množství rozpuřtěné soli.

Jestliže bylo místo pro měření vybráno vhodně a nedochází k řádným ztrátám ani přítokům vody, data vytvoří grafy podobné obrázku 3.1. Na obrázku je vidět, že při zvolení krátkého úseku nedojde k dostatečnému promíření stopovače, proto hodnoty konduktivity prudce vzrostou a po odnosu stopovače proudem opět prudce klesnou. Při nastavení dlouhého intervalu zaznamenávání hodnot konduktivity by mohl být výsledek měření silně zkreslen. V opačném případě, že je dráha stopovače příliš dlouhá, se zvyšuje pravděpodobnost ztráty, nebo velmi dlouhého zdržení a rozředění stopovače cestou k řidlu. Dále popisuje obrázek řůznorodost peaku vzhledem k vzdálenosti od řřehu. Při injektování stopovače do proudnice je peak větší, než při injektáři ke řřehům kde je tok vody řřehem zpomalován.

3.11 Výpočet průtoku z dat naměřených konduktometrem

Po získání naměřených dat konduktivity σ je nutné ji přepočítat na koncentraci c . Využitím směrnic z kalibrační řřímky a rovnice (Kopáč, 2007; ISO 9555-3, 1992)

$$c = (\sigma - \sigma_p) \cdot a,$$

kde σ_p je pozadřová konduktivita, a je směrnice kalibrační řřímky. Výsledný výpočet průtoku vychází z rovnice

$$Q = \frac{M}{\int_{t_0}^{t_i} (c_i - c_p) dt},$$

kde M je hmotnost injektované soli, t_0 je čas příchodu stopovače k sondě, t_i je čas návratu konduktivity na požadovou konduktivitu, c_p je hodnota požadové koncentrace toku, c_i je dílčí naměřená hodnota koncentrace stopovače ve vodě.

3.12 Typy chyb vedoucí k nesprávnosti výsledku

I přesto, že metoda měření průtoku stopovači je relativně přesná, není složité udělat během měření chyby vedoucí ke špatným výsledkům. Podle normy (ISO 9555-3, 1992) ISO 9555-1 existují dva typy chyb – náhodné a systematické.

1) Náhodné chyby vznikají pověřenou osobou při měření (např. nedodržení doporučeného postupu) nebo chyby vzniklé při vyhodnocování výsledků (např. numerické chyby). Juraschek (2002) uvádí následující chyby.

a) Nerozpuštění celého množství soli v nádobě.

V nádobě, kde se míchá přesně naměřené množství soli, často nedochází k úplnému rozpuštění stopovače. Proto je nutné dbát na injektování celého objemu stopovače. Jelikož se v rovnici pro výpočet průtoku (3.1) nachází plocha pod změřenou křivkou koncentrace ve jmenovateli, dochází při rozpuštění necelého množství k nadhodnocování průtoku. Plocha vyjde menší, než by měla, takže průtok vyjde větší.

b) Špatné zvážení soli.

Přidanou sůl je nutné zvážit s minimální chybou. Maximální odchylka naměřené hmotnosti by měla být menší než 1 % od skutečností hmotnosti přidané soli (Juraschek, 2002). Chyba přitom může vzniknout díky nevhodnému skladování.

c) Špatné skladování soli.

Dalším faktorem ovlivňujícím hmotnost soli je neúmyslné zvýšení její hmotnosti skladováním na vlhkém místě. Skladováním ve vlhkých prostorách dochází k umělému navyšování hmotnosti, kdy se vlhkost drží mezi krystaly soli (Juraschek, 2002). Je tedy nutné ji skladovat na místě suchém.

d) Chybná kalibrace.

Správná kalibrace přístroje patří mezi nejdůležitější faktory vedoucí k správným výsledkům. I když je to nepravděpodobné, chyba může vzniknout už při vytváření kalibračního roztoku. Samotná kalibrace musí být prováděna z vody z místa měření a při měření konduktivity v odměrném válci by měla být voda s kalibračním roztokem dobře promíchána a změřena víckrát (Richardson a kol., 2017).

e) Umělé zvýšení průtoku po nálevu stopovače.

V tocích s velmi malým průtokem může být výsledek zkreslen množstvím nalitého roztoku stopovače. V takovém případě je vhodné rozmíchat menší množství soli v menším objemu vody.

U všech výše zmíněných chyb je možnost jejich zmenšení vícenásobným opakováním měření.

2) Systematické chyby jsou vyvolané změnou vnějších podmínek, nedodržením postupu při měření nebo vadou přístroje.

a) Chyba vyvolaná změnou samotného průtoku během měření.

Na menších tocích s malou rychlostí je chyba největší při náhlé změně průtoku. Jestliže se průtok mění pomalu a plynule, rozdíl naměřené a skutečné hodnoty průtoku není velký.

b) Chyba vyvolaná oblastí průchodu stopovače.

Při nevhodně vybraném místě dochází k infiltraci stopovače do dna, např. infiltrace do dna štěrkového. V tomto případě jde o nepřímou úměru mezi ztrátou stopovače a výsledným průtokem.

c) Chyba vyvolaná předčasným ukončením měření.

Jestliže je experiment ukončen předčasně a úsekem neprotekl celkový objem rozpuštěné soli, bude výsledná hodnota průtoku vyšší než hodnota skutečná z důvodu výpočtu menší plochy pod křivkou. V případě, že experiment trvá dlouho, je vhodné zkontrolovat, zda se nezměnila pozadová konduktivita během měření. V případě, že se pozadí na kontrolním konduktometru změnilo oproti začátku měření o několik jednotek, je možné měření ukončit např. pokud se na měřícím konduktometru hodnota ustálila o stejný počet jednotek oproti začátku měření. Jedná se o přibližné pravidlo, protože různé přístroje se mohou mírně lišit i velikostí jednotky. Pro dva roztoky s různými konduktivitami mohou ukázat různé rozdíly v konduktivitě obou roztoků.

d) Chyba vyvolaná špatným promíšením stopovače.

Tuto chybu lze odhadovat, když je známé prostorové rozložení koncentrace stopovače. Pro výpočet chyby je zaveden koeficient e chyby měření (ISO 9555-1, 1994)

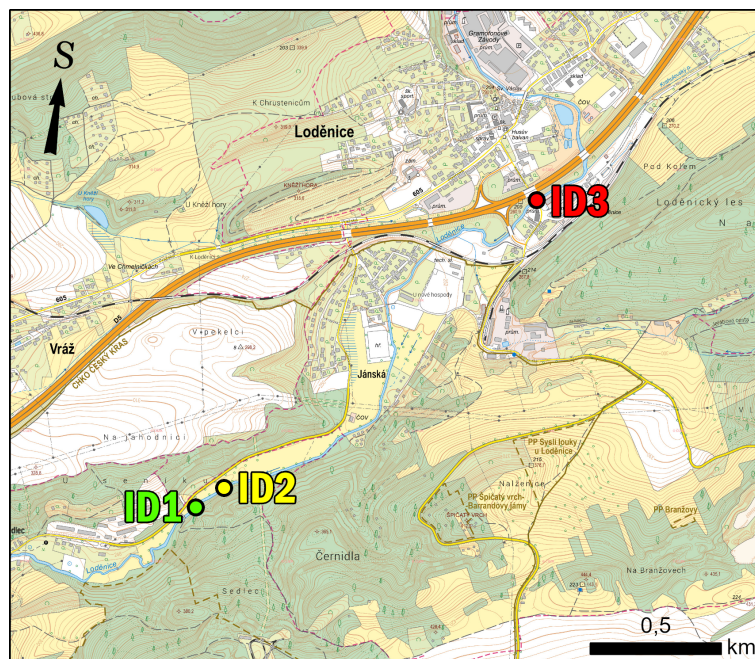
$$e = 2(100 - X).$$

3.13 Vliv soli na ekosystém v okolí toku

Jednorázová injekce soli do řeky může mít určitý vliv na okolní prostředí. Sůl může mít negativní dopad na životní prostředí vodního ekosystému. Příliš vysoké koncentrace soli mohou ovlivnit životní podmínky vodních organismů, zejména citlivých druhů, jako jsou ryby, obojživelníci, hmyz a rostliny. NaCl má za následek zvýšení driftu bezobratlých živočichů (Allan, 1995). Jako „drift“ se označuje jev, kdy se živočichové neaktivně přenášejí ve vodním sloupci s proudem toku. Tento jev se často vyskytuje v potocích, kde voda proudí rychleji. Drift může být způsoben různými faktory, včetně potravního zdroje, rozmnožování a vnitřního chování živočichů. Drift je důležitým procesem pro bezobratlé živočichy, protože jim umožňuje šířit se na nová místa, hledat potravu, uniknout predátorům nebo najít vhodné podmínky pro rozmnožování. Vyšší koncentrace soli mohou narušovat osmoregulaci a mít toxické účinky. Podle Wooda a Dykese (2002) může být drift způsoben i jednorázovou injekcí soli při stopovací zkoušce, avšak podle nich je nepravděpodobné, že by jednorázové zvýšení koncentrace mělo větší vliv na ekosystém a populaci bezobratlých. Na druhou stranu tvrdí, že měření s jednorázovou injekcí může mít vliv na okolní prostředí, když se koncentrace NaCl mění zprudka oproti měření s injekcí kontinuální. Podle Jurascheka (2002) je použití NaCl neškodné a nemá větší vliv na ekosystém.

4. Terénní práce

Terénní práce byly prováděny 29.6.2023 na třech místech (úsecích vodoteče označených ID1, ID2 a ID3) na vodním toku Loděnice mezi obcemi Loděnice a Sedlec nedaleko Berouna, viz mapa na obr. 4.1. Geologicky spadají do Barrandienského paleozoika. Řeka Loděnice protéká deluviálními a nezpevněnými nivními sedimenty (ČGS, 2023), jejichž podloží je, stejně jako svahy údolí, tvořené buď výlevnými vulkanity – bazalty silurského stáří (lokality ID1 a ID2), nebo ordovickými jílovitými břidlicemi a jíly (lokality ID3). Loděnice je levostranný přítok Berounky s celkovou plochou povodí 270,24 km². Mezi pramennou oblastí v pohoří Džbán pod stejnojmenným vrcholem (536 m n. m.) a vtokem do Berounky (30,34 říční kilometr Berounky) urazí voda 64,72 kilometrů. Střední sklon toku je 4,43 ‰, přičemž více než polovinu délky toku dominují sklony 2–5 ‰.

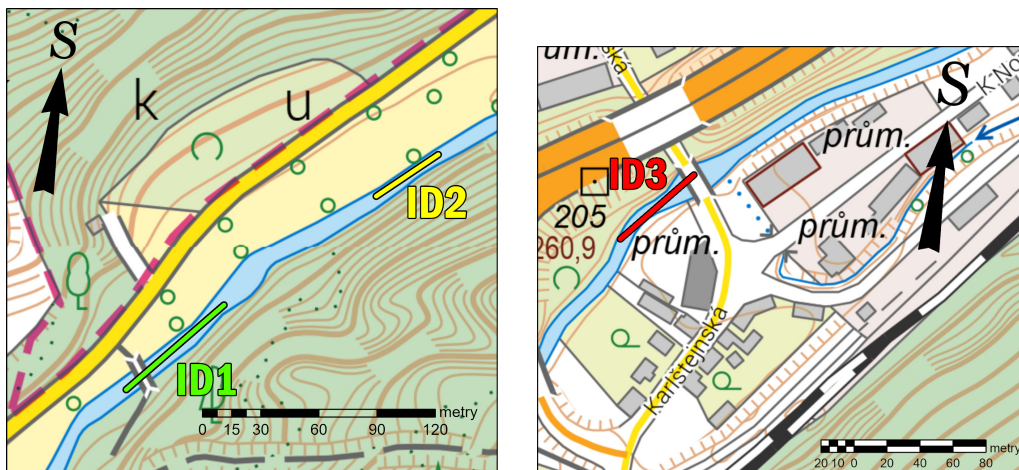


Obrázek 4.1: Pozice lokalit na toku Loděnice.

4.1 Lokality

Lokalitami označuji úseky toku Loděnice, na kterých bylo provedeno měření (obr. 4.2).

První lokalita (označená jako ID1) se nachází u mostu přes Loděnici mezi obcemi Janská a Sedlec. Tento úsek je 78 metrů dlouhý. Na úseku se nachází minimum vratiproudů. Úsek je rovný, s občasnou překážkou v toku a peřejkami v závěru. Rychlost toku byla obecně pomalejší a bez větších turbulencí během



Obrázek 4.2: Zakreslení úseků–lokalit, na kterých byla prováděná měření.

dráhy od místa injecktáže k místu měření.

Druhá lokalita (ozn. ID2) se nachází 135 metrů proti proudu od ID1 (135 m je vzdálenost mezi místy injecktáže na lokalitách ID1 a ID2). V tomto úseku se střídají krátké, mělké peřejky (délka první metry) s klidnějšími úseky s častými překážkami v toku (obr. 4.3). Při vybírání úseku bylo dbáno na to, aby se v něm nenacházely žádné větší vratiproudy. Místo injecktáže se nacházelo v klidnějším úseku několik metrů po proudu od peřeje s jedním velkým jazymem s vratiproudy po stranách. Konduktometry GS1, GS2, UKA, UKB a UKC měřily přímo v peřejích. Hloubka toku je v tomto úseku poměrně stálá, kolem 12 cm.



Obrázek 4.3: Charakter toku Loděnice na lokalitě ID2 (vlevo) a umisťování konduktometrů GS1 a GS3 do proudu (vpravo). Foto T. Ondovčín.

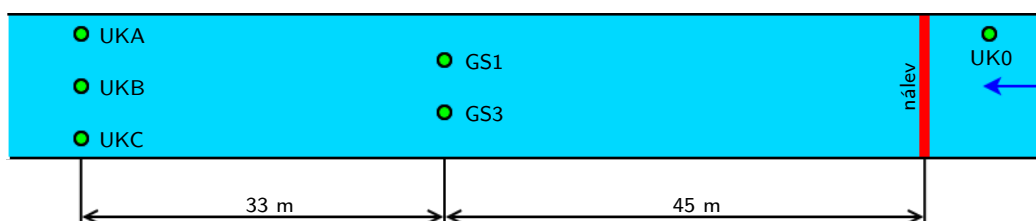
Třetí lokalita (ozn. ID3) se nachází přímo v obci Loděnice pod mostem v ul. Karlštejská, 13 metrů po proudu od vodoměrné stanice ČHMÚ v Loděnici

(ČHMÚ, 2023). Vzdálenost lokality ID3 je 950 metrů od ID2 proti proudu Loděnice. Na lokalitě se nachází ostrůvek, který je z pravé strany obtékán hlavním proudem. Přibližně 30 metrů po proudu od něj začíná výrazně hlubší, klidnější úsek toku. Hloubka v úseku mezi ostrůvkem a tůní byla do 30 cm, v tůni kolem jednoho metru.

4.2 Průběh měření

Pro každé měření bylo použito šest konduktometrů WTW 3310 se sondami TetraCon 325. Čtyři přístroje patří Přírodovědecké fakultě (ozn. UK0, UKA, UKB, UKC), dva byly zapůjčené Českou geologickou službou (ozn. GS1 a GS3).

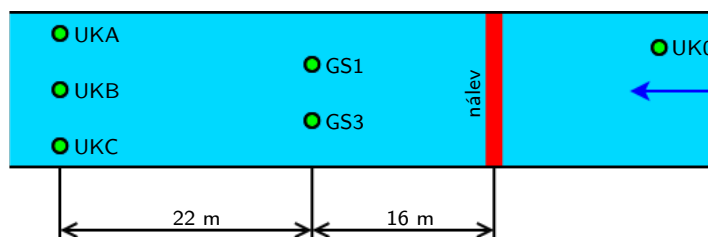
Pět konduktometrů vždy měřilo konduktivitu vody v korytě, šestý konduktometr (UK0) byl umístěn proti proudu nad místem injektáže a měřil přirozenou konduktivitu vody (pozadí) během všech experimentů. Konduktometry byly rozmístěny v toku do skupin. GS1 a GS3 byly vždy umístěny spolu a blíž místu injektáže, každý blíž jednoho břehu toku. Ostatní (UKA, UKB, UKC) byly umístěné na místě dále po proudu, s konduktometrem UKB vždy uprostřed toku (viz obr. 4.4 a 4.5).



Obrázek 4.4: Schéma měření na první lokalitě (ID1) – u mostku přes Loděnici mezi Jánskou a Sedlecí.

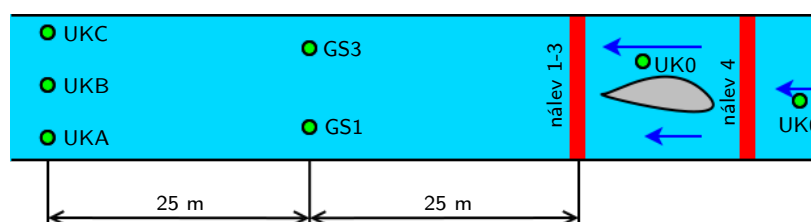
Na první lokalitě byly provedené dvě injektáže, na druhé tři a na třetí čtyři. Pro všechny injektáže kromě poslední bylo v nádobě rozmícháno ve vodě z toku 250 g kuchyňské soli. Poslední injektáž na lokalitě ID3 obsahovala 500 g soli. Konduktivita byla zaznamenávaná s časovým krokem 5 s. Každé měření by mělo skončit v momentě, kdy se konduktivita na všech přístrojích vrátí na svou původní hodnotu. Taková situace nikdy nenastala, protože se požadovaná konduktivita v průběhu experimentů neustále měnila (viz záznam UK0 na obr. 5.4), tudíž bylo měření ukončeno podle úbytku nebo příbytku požadové koncentrace odečtené z displeje UK0.

Konduktometry GS1 a GS3 byly na třetí lokalitě umístěné do mělčího úseku mezi ostrůvkem a tůní. Konduktometry UKA, UKB a UKC byly umístěné v tůni. Koryto mezi místem injektáže a skupinou konduktometrů GS3 a GS1 bylo mělké, se šterkovým dnem. Konduktometr GS3, při pravém břehu, měřil v nejhlubším místě koryta, v místě s nejvyšší rychlostí proudění. Čidlo konduktometru GS1 ve stejné části u protějšího břehu leželo v mělčině na šterkovitém dně. Bě-



Obrázek 4.5: Schéma měření na druhé lokalitě (ID2).

hem prvních tří měření, kdy bylo použito 250 gramů soli, byla provedena injekce pod ostrůvkem (obr. 4.6). Čtvrtá injekce byla provedena nad ostrůvkem, tudíž stopovač protékal i vedlejším proudem z levé strany ostrůvku. Při této poslední injekci bylo použito 500 gramů soli.



Obrázek 4.6: Schéma měření na třetí lokalitě (ID3) – pod mostkem v Karlštejské ul. v Loděnici.

Na všech lokalitách byl průtok současně změřen FlowTrackerem, který obsluhovala diplomantka bc. Kamila Tučanová. Zároveň byl občas sledován průtok na vodoměrné stanici na webu raft.cz (Ptáček, 2023).

4.2.1 Kalibrace konduktometrů

Kalibrací se rozumí vztah mezi konduktivitou vody, jak ji na dané lokalitě měří daný konduktometr, a koncentrací přidané soli ve vodě. Protože každý konduktometr ukazuje trochu jiné hodnoty konduktivity, je potřeba pro získání hodnot koncentrace provést kalibraci všech šesti konduktometrů. Kalibrace konduktometrů probíhala na třetí lokalitě.

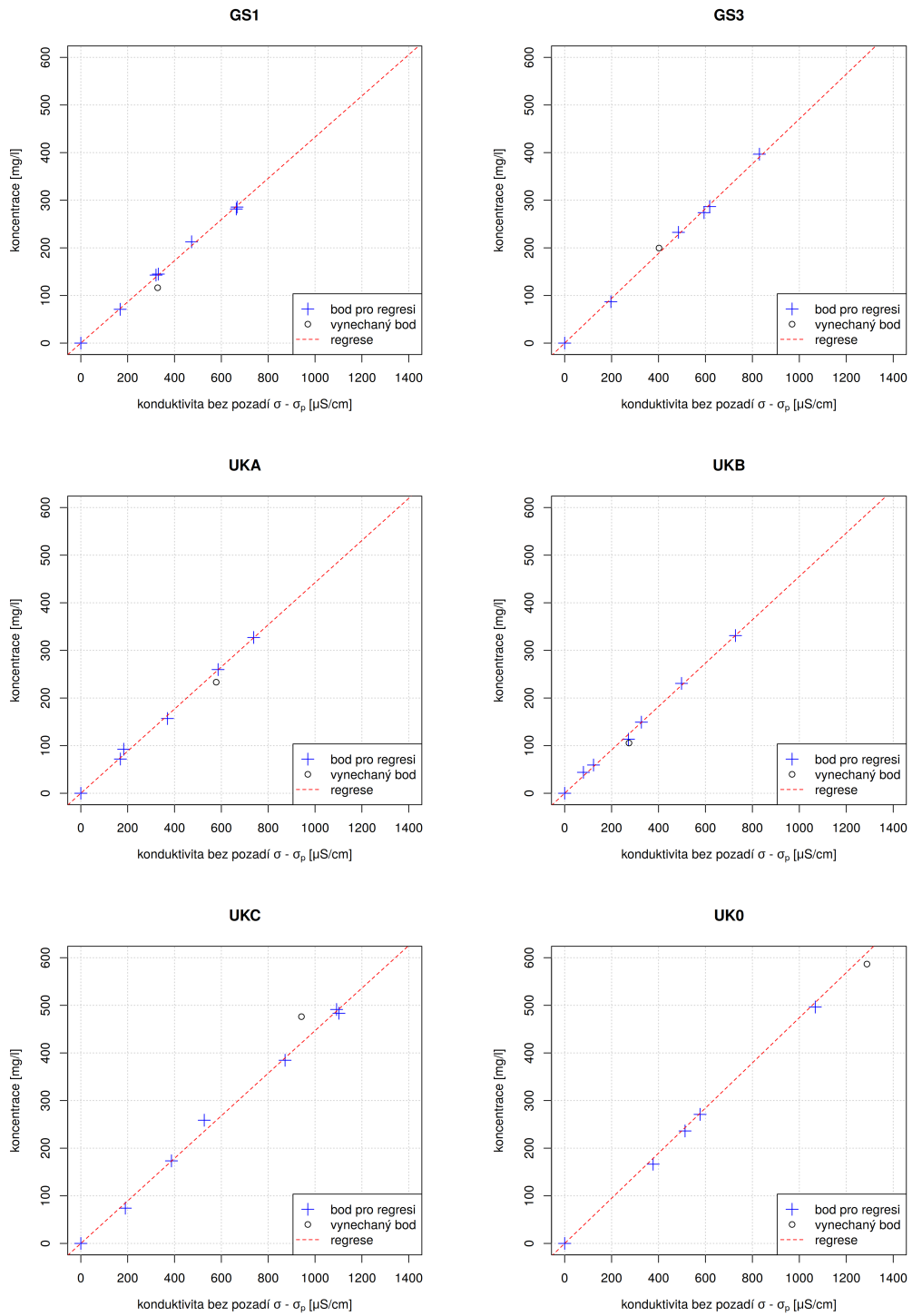
Sůl byla přidávána vždy do čistého odměrného válce do známého objemu vody z koryta v podobě malého objemu solného roztoku o koncentraci 10 g/l. Takto bylo připraveno šest a více roztoků a změřena jejich konduktivita. Větší počet roztoků byl připravený a změřený, pokud se zdálo, že dva roztoky s blízkou koncentrací mají příliš odlišnou konduktivitu.

Pro každý konduktometr byly do grafu koncentrace přidané soli c vyneseny proti konduktivitě σ po odečtení pozadí σ_p . Pomocí korelace bylo určeno, které měření nejméně zapadá do přímé úměrnosti mezi koncentrací přidané soli a konduktivitou nez pozadí, a toto měření bylo z dalšího zpracování vypuštěno. Metodou nejmenších čtverců byla v softwaru R (R Core Team, 2018) ostatními

body proložená přímkou

$$c = a \cdot (\sigma - \sigma_p).$$

Tabulka 4.1 uvádí směrnice regresních přímk, které vyšly z kalibrace pro jednotlivé konduktometry. Na obrázku 4.7 jsou grafy kalibračních bodů a přímk pro všechny konduktometry.



Obrázek 4.7: Kalibrační přímky konduktometrů. Roztoky použité pro regresi jsou označené křížky, vynechaný roztok kroužkem (regrese bez něj vychází nejpřesněji).

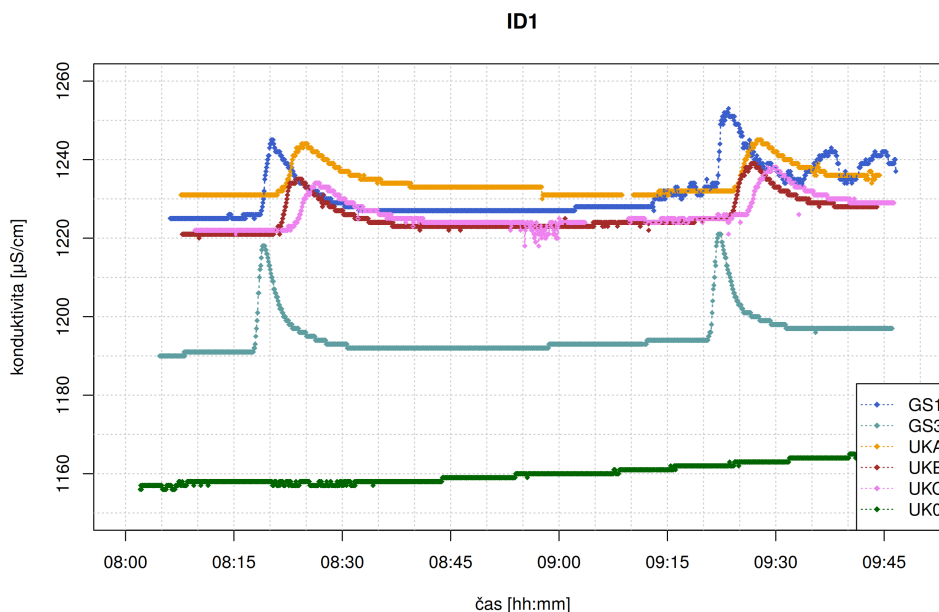
Tabulka 4.1: Koeficienty regresních přímek ve tvaru $c = a(\sigma - \sigma_p)$, kde konduktivita σ musí být dosazená v $\mu\text{S}/\text{cm}$ a koncentrace c vychází v mg/l . Třetí sloupec tabulky obsahuje Pearsonův korelační koeficient.

Přístroj	a	Pearsonův k. k.
GS1	0,4324800	0,9991196
GS3	0,4706515	0,9994258
UK0	0,4739155	0,9997518
UKA	0,4423214	0,9987914
UKB	0,4553199	0,9988550
UKC	0,4467553	0,9983037

5. Zpracování dat a výsledky

5.1 Zpracování dat

Po získání dat byla tabulka rozdělená podle lokalit. Konduktometry byly rozděleny do skupin podle vzdálenosti od místa injeckáže – bližší skupina konduktometry GS1 a GS3 vzdálenější skupina konduktometry UKA, UKB a UKC. Záznamy z konduktometrů jsou vyneseny na obr. 5.1, 5.2 a 5.3.

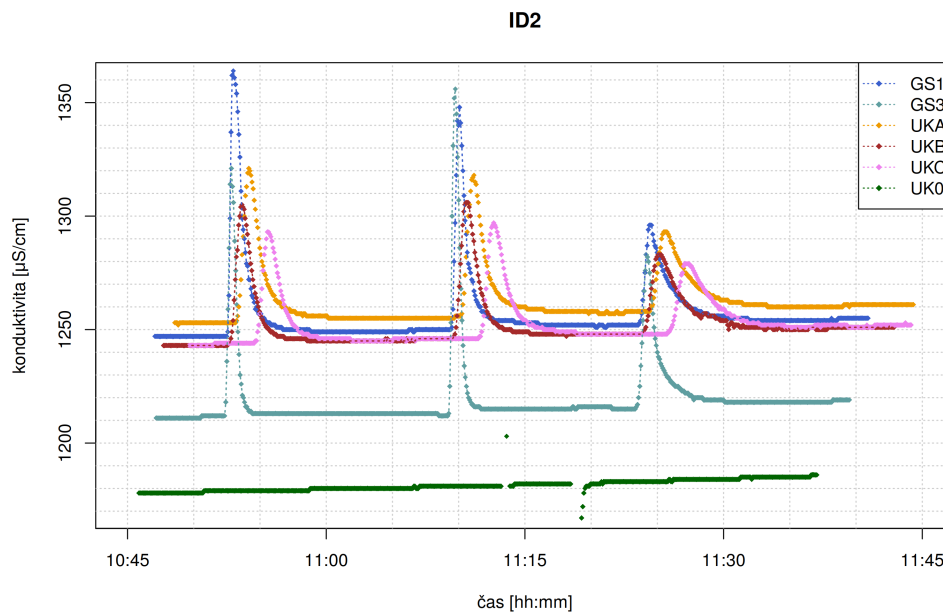


Obrázek 5.1: Záznamy všech konduktometrů z lokality ID1.

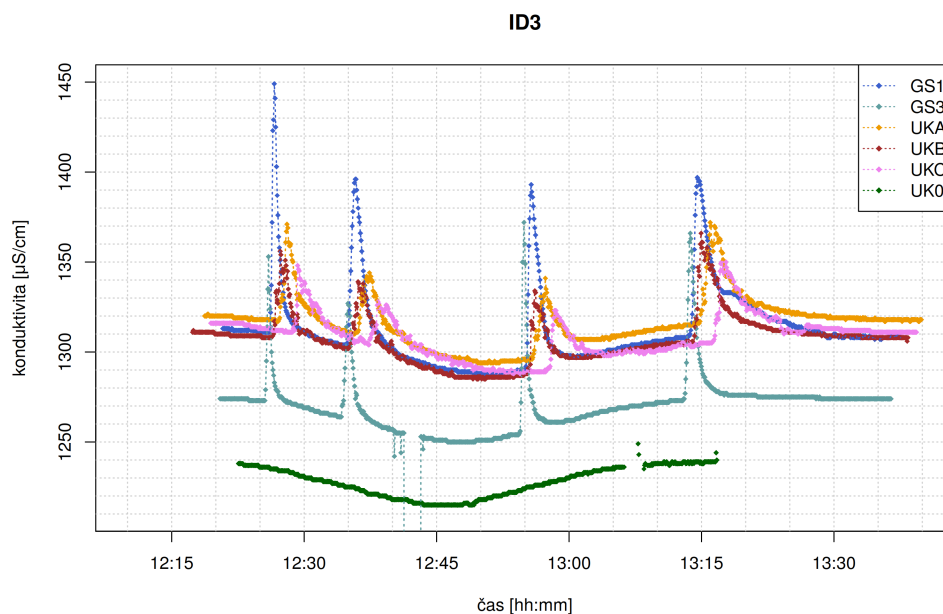
5.1.1 Odečtení pozadí

Z grafů na obrázku 5.4 je vidět, že se na všech lokalitách měnila konduktivita během celého měření. Protože je pro vyhodnocení potřeba pracovat pouze s nárůstem koncentrace oproti pozadovým hodnotám, je nutné odečíst pozadovou hodnotu konduktivity. Odečítání pozadové konduktivity zajišťuje hodnoty přírůstu koncentrace stopovače. U měření na lokalitách ID1 a ID2 pozadová konduktivita monotónně stoupala a na lokalitě ID3 první polovinu měření klesala, potom stoupala, až se vrátila na svou původní hodnotu. Pozadová konduktivita na ID1 a ID2 vyšla pěkně na ID3 ne.

Pro lokality ID1 a ID2 jsem hodnoty z konduktometrů GS1, GS3 a UKA, UKB, UKC posunul oproti hodnotám z UK0 o čas, který vodě zabralo překonání vzdálenosti mezi konduktometry. Posun jsem odhadl z příchodu maxima na křivce konduktivity pro každý konduktometr. Potom jsem při každém přírůstu pozadové konduktivity na UK0 odečetl velikost tohoto přírůstu od



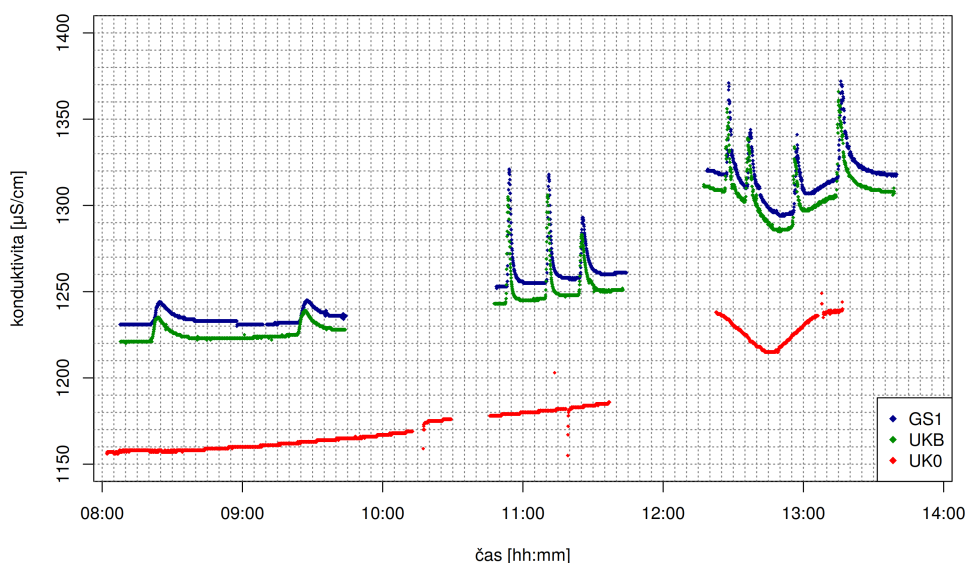
Obrázek 5.2: Záznamy všech konduktometrů z lokality ID2.



Obrázek 5.3: Záznamy všech konduktometrů z lokality ID3.

hodnot naměřených ostatními konduktometry. Tím jsem odečetl trend ze záznamů a stačilo pak odečíst jen konstantu – pozadovou hodnotu na každém konduktometru.

Pozadová konduktivita se na třetí lokalitě měnila nejvýrazněji a ne monotónně (viz obr. 5.3). Během injektáží i mezi nimi nejdříve půl hodiny klesala, pak zhruba stejnou dobu stoupala. Pozadová konduktivita pro jednotlivá čidla byla spočítaná z konduktivity změřené UK0. Předpokládali jsme, že před



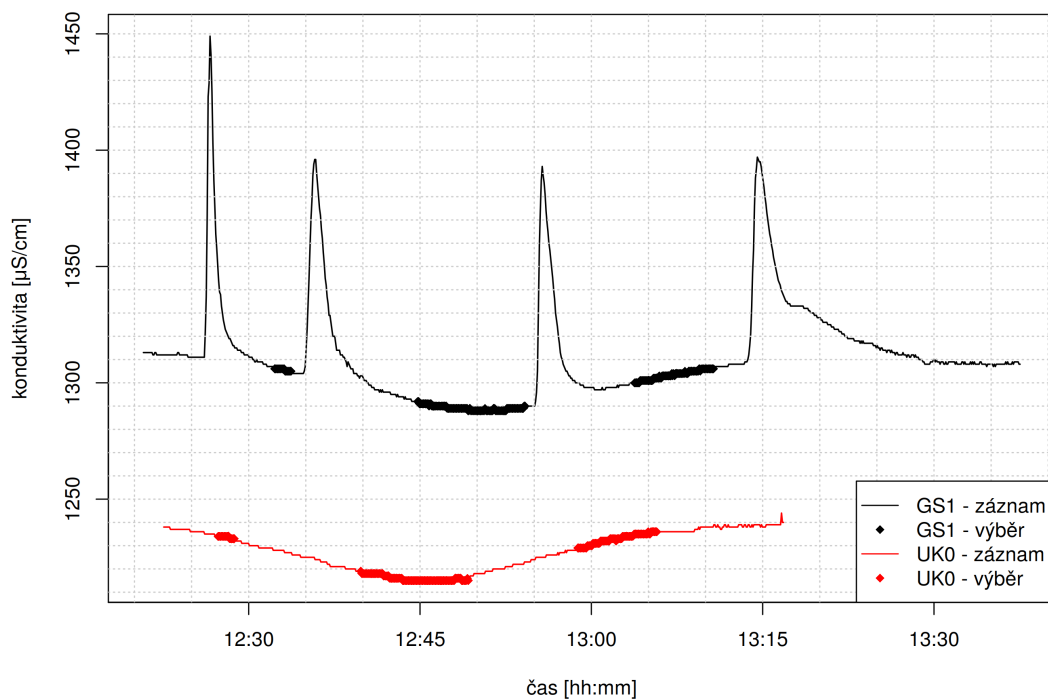
Obrázek 5.4: Záznam měření ze všech tří lokalit z konduktometrů GS1, UKB a UK0. GS1 měřilo vždy blíž místu injektáže, UKB dál od něj. UK0 měřilo vždy nad místem injektáže pozadovou konduktivitu.

každou injektáží kolem čidla teče voda bez přidané soli. Měření z těchto úseků (viz obr. 5.5) jsme dali do vztahu (lineárního, pro konduktometr UKC kvadratického) s odpovídajícími konduktivitami ze záznamu UK0 posunutého v čase tak, aby si odpovídala minima na záznamech. Tyto vztahy jsme použili k přepočítání konduktivity z UK0 na odhady konduktivit na ostatních konduktometrech. Spočítané řady jsme doplnili na stejnou délku, abychom je mohli od záznamů z ostatních konduktometrů odečíst a získali tak data vhodná k vyhodnocení (obr. 5.6). Pro čidlo UKC vyšla požadovaná konduktivita nejhůř, viz 5.7.

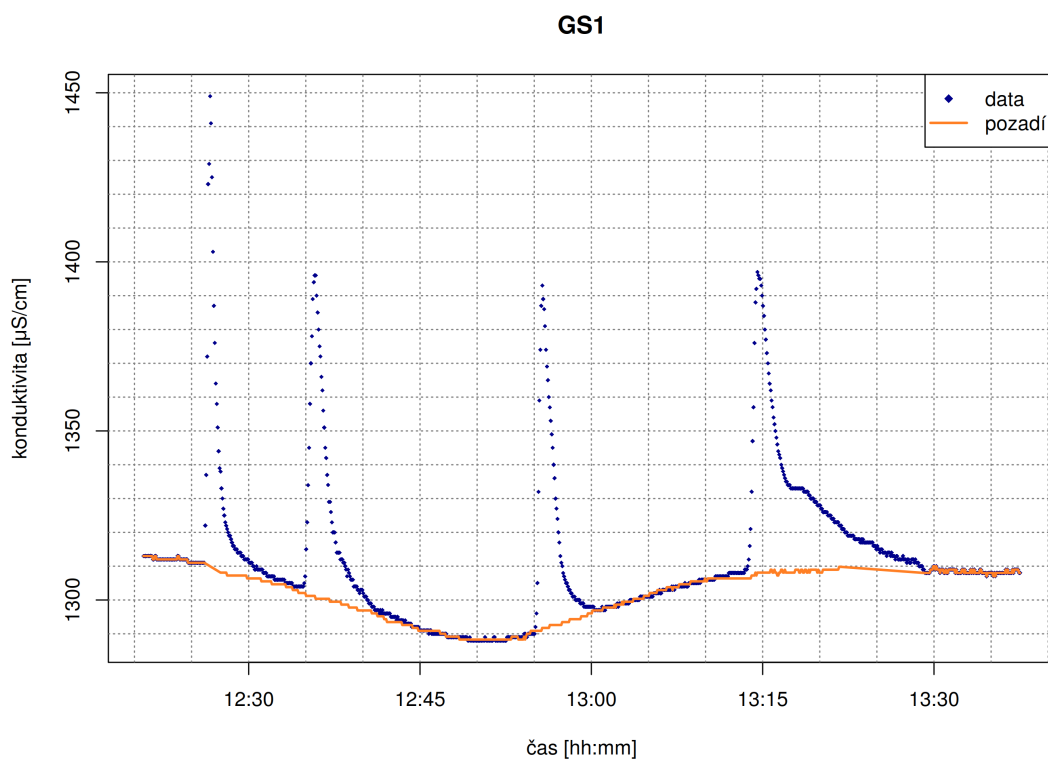
5.2 Výsledky

Na grafu 5.4 je vidět, že velikost peaků na ID1 je třetinová oproti ID2 a ID3. To je způsobené značně větší vzdáleností místa injektáže a konduktometry, na ID2 a ID3 byla 45 metrů. Pro lokality ID1 a ID2 byla tato vzdálenost 16 metrů (ID2) a 25 metrů (ID3). Během měření na druhé lokalitě ukazuje UK0 minimální změnu pozadové konduktivity. To značně zjednodušilo vyhodnocování naměřených hodnot.

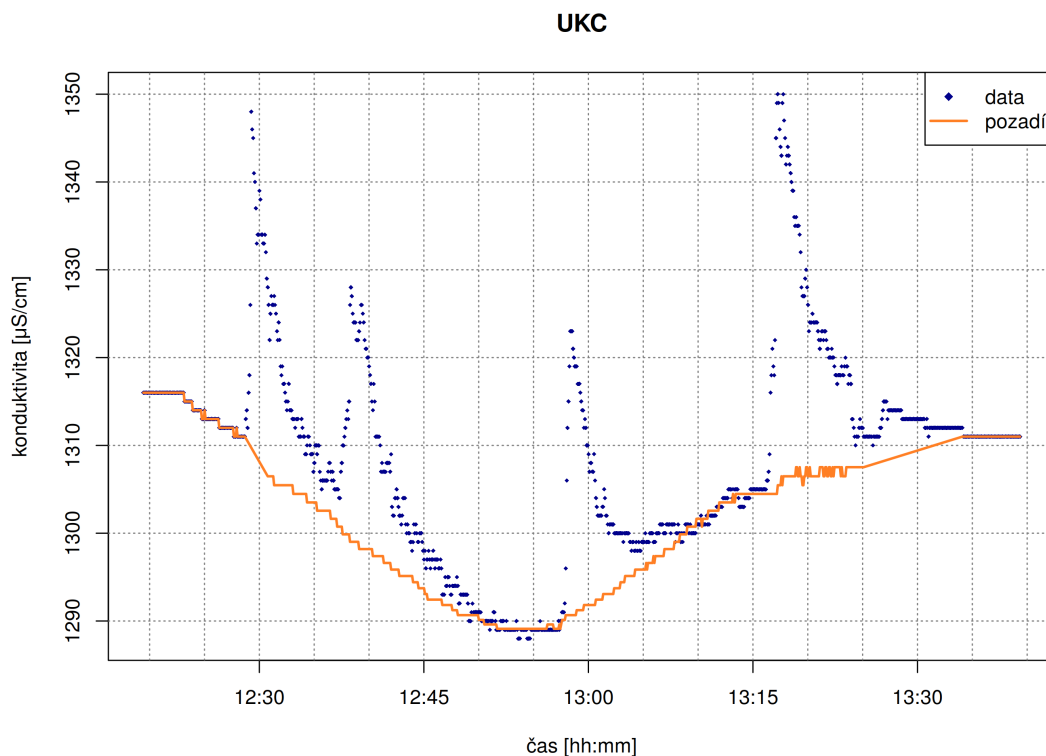
V grafu pro konduktometr UK0 na lokalitě ID3 je vidět, že během 54 minut se konduktivita změnila z $1238 \mu\text{S/cm}$ na $1215 \mu\text{S/cm}$ a za zpět na hodnotu $1238 \mu\text{S/cm}$. Mezi časem 13:05 a 13:10 je v grafu mezera, která vznikla vyjmutím přístroje z vody při jeho přesunu (konduktivita klesla k nule, což kvůli rozsahu na svislé ose není vidět). Z modrého grafu je také vidět, že se požadová



Obrázek 5.5: Výběr bodů pro vztažení konduktivity z UK0 ke konduktivě na GS1.



Obrázek 5.6: Záznam konduktivity z GS1 a pozadová konduktivita pro GS1 spočítaná ze záznamu z UK0.



Obrázek 5.7: Záznam konduktivity z UKC a požadová konduktivita pro GS1 spočítaná ze záznamu z UK0.

Tabulka 5.1: Výsledné průtoky pro jednotlivé injektáže na všech lokalitách.

injektáž č.	ID1		ID2			ID3			
	1	2	1	2	3	1	2	3	4
GS1	47,3	—	60,2	79,5	81,7	70,8	68,4	65,5	68,0
GS3	82,4	82,3	118,4	86,9	91,8	163,5	127,5	96,5	147,5
UKA	82,4	86,6	71,6	72,8	73,6	104,5	96,2	83,2	104,2
UKB	77,1	75,3	74,8	79,7	68,9	106,6	95,6	117,2	88,9
UKC	71,1	81,4	76,8	81,1	67,9	115,9	105,2	97,3	107,7

konduktivita v čase mění. Z konduktometru GS1 lze vidět čtyři peaky. Při prvních třech bylo rozpuštěno 250 gramů soli. Na poslední měření bylo rozpuštěno gramů 500, proto je pod touto částí křivky znát větší plocha, než u předešlých tří měření. Výsledné hodnoty z druhého, třetího a čtvrtého měření jsou shodné s FlowTrackerem a vodočtem, od kterého jsme měřili asi 20 metrů. I přesto, že mezi skupinami konduktometrů GS1, GS3 a konduktometry UKA, UKB a UKC protékala voda velmi pomalu, bez promíchávání.

Hodnoty všech vyhodnocených průtoků ze všech konduktometrů na vše třech lokalitách jsou v tabulce 5.1. Tabulka 5.2 uvádí hodnoty průměrů průtoků (P), směrodatnou odchylku průměrů průtoků (SO) a variační koeficient.

Tabulka 5.2: Průměrné průtoky (P) v l/s, směrodatné odchytky (SO) v l/s a poměr těchto dvou hodnot (variační koeficient) v procentech pro jednotlivé skupiny konduktometrů na všech lokalitách. Bližší profil – konduktometry GS1 a GS3, vzdálenější profil – konduktometry UKA, UKB, UKC.

	Bližší profil			Vzdálenější profil		
	P	SO	VK	P	SO	VK
ID1	82,4	0,04	0,05	79,0	5,1	6,50
ID2	86,4	17,40	20,10	74,1	4,2	5,70
ID3	98,5	3,61	36,80	102,4	10,0	9,80

Variační koeficient je podíl směrodatné odchytky a průměru průtoku a je udáván v procentech. Menší hodnota variačního koeficientu znamená věrohodnější výsledek. Nejmenší variační koeficient vyšel pro bližší profil na ID1 (0,05), naopak nejvyšší pro bližší profil na ID3 (20,1). Průtoky v tabulce 5.2 jsou aritmetrické průměry průtoků naměřených skupinou konduktometrů GS1, GS3 a UKA, UKB, UKC. Pro výpočet průměru průtoku z vzdálenějšího profilu na ID1 nebyly použity hodnoty průtoků z GS3 a pro výpočet průměru průtoku z bližšího profilu na ID3 nebyly použity hodnoty průtoků z GS1.

6. Diskuse

Během terénního výjezdu na řeku Loděnici bylo provedeno celkem 9 injektáží soli. Protože bylo měřeno dohromady pěti konduktometry, měli bychom dostat 45 hodnot. Na lokalitě ID1 a konduktometru GS1 nebylo možné vypočítat hodnotu průtoku z důvodu překrývání dvou stopovacích zkoušek. Pravděpodobně způsobeno tím, že profilem ještě neprotekla všechna sůl, když bylo započato další měření.

Pro zhodnocení chyby všech výsledků jsme použili aktuální hodnoty průtoku ze zdrojů ČHMÚ (ČHMÚ, 2023) s hodnotou průtoku na moderním vodočtu v nedaleké obci Jánská. Hodnota na vodočtu mírně kolísala, 65–66 l/s během dopoledne, 63 l/s později odpoledne. Pro lokality ID1 a ID2 jsem proto použil hodnotu 66 l/s a pro ID3 hodnotu 63 l/s.

Do výpočtu výsledků nebyly použity hodnoty z lokality ID3 pro konduktometr GS3. Průměr naměřených průtoků vychází 133,25 l/s, což je nejspíš způsobeno tím, že sonda byla u pravého břehu vložena do velmi rychlého proudu v zúžení toku. Hodnoty konduktivity na grafu prudce vzrostly a poté prudce klesly. Je možné, že zmenšení intervalu zaznamenávání hodnot konduktivity by zaručilo lepší výsledek. Nejkratší hodnoty časového intervalu, jaké jsou přístroje WTW 3310 schopny zaznamenávat, je jedna sekunda. U levého břehu toku, kde voda tekla podstatně pomaleji, měřil konduktometr GS1, pro který vyšly hodnoty průtoku v dobré shodě s vodoměrnou stanicí.

Při měření FlowTrackerem vyšly pro ID1 hodnoty 67,1 l/s s nejistotou měření 3,92 % a s použitím méně svislic 72,4 l/s s nejistotou měření 5,8 %. Při použití chemické metody vycházely hodnoty vyšší. Na ID2 vyšly hodnoty průtoku 74,1 l/s s nejistotou měření 3 %. Blízké hodnoty vycházejí pro skupinu konduktometrů UKA, UKB, UKC, které měřily dále po proudu. Na lokalitě označené jako ID3 vyhodnotil FlowTracker hodnotu průtoku 78,8 l/s s nejistotou měření 3,38%. Hodnoty z průměru průtoků z měření chemickou metodou jsou opět znatelně vyšší. Konkrétně 98,5 l/s pro GS1 a GS3 a 102,4 l/s pro vzdálenější skupinu konduktometrů UKA, UKB a UKC 5.4.

Hodnota nejbližší hodnotě naměřené FlowTrackerem je průměr průtoku z všech tří konduktometrů na lokalitě ID2. Tato lokalita se zdála být pro usazení čidel nejvhodnější, díky turbulnetnímu charakteru v celém úseku, kde dochází k silnějšímu promíchání a zároveň byla malá pravděpodobnost vzniku bublinky uvnitř sondy. Výsledná hodnota je stejná jako hodnota získaná FlowTrackerem.

Obecně platí, že výsledné průtoky pro konduktometry UKA, UKB a UKC, jsou systematicky vyšší. Všechny tyto konduktometry měřily nejdále od místa

Tabulka 6.1: Ztráty soli ξ v procentech při jednotlivých injektážích na všech lokalitách.

	Bližší profil	Vzdálenější profil
ID1	19,9	16,5
ID2	23,4	11,0
ID3	6,9	38,5

injektáže. Vyšší hodnoty výsledných průtoků by mohly být způsobeny ztrátami soli na trase mezi místem nálevu a sondou (Bruthans, 2003, ústní sdělení). Pokud by to tak bylo, ztráta se dá vyčíslit.

Z koncentrací spočítaných z naměřených konduktivit vyjde plocha pod křivkou A_m , která je při ztrátách menší, než by byla plocha beze ztrát A_s . Můžeme mezi nimi zavést vztah

$$A_m = \alpha A_s,$$

kde α vyjadřuje procento soli, které bylo čidlem změřené. Průtok Q_m vypočítaný podle vzorce (3.1) je potom

$$Q_m = \frac{M}{A_m} = \frac{M}{\alpha A_s},$$

takže skutečný průtok Q_s , jaký by vyšel beze ztrát, je

$$Q_s = \alpha Q_m$$

a ztráty $\xi = 1 - \alpha$ pak lze spočítat

$$\xi = 1 - \frac{Q_s}{Q_m}. \quad (6.1)$$

Protože známe skutečnou, přesnou hodnotu průtoků z vodoměrné stanice, můžeme spočítat pro jednotlivé injektáže ztráty na každém čidle. Výsledky jsou uvedené v tabulce 6.1.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá měřením průtoku chemickou metodou. Práce popisuje fyzikálně-chemické chování stopovače při stopovací zkoušce. Byly zde uvedeny typy stopovačů s předností využití soli jako stopovače. V textu je podle citované literatury vysvětlena kritéria pro vybrání vhodného místa a jejich odůvodnění, dále popsán průběh samotného měření a vyhodnocování výsledků. Čtenář je seznámen s typy častých chyb, vedoucích k dosažení špatných výsledků a vlivem celé metody na okolní ekosystém.

V terénní části práce je popsáno konkrétní měření, které bylo provedené na řece Loděnici nedaleko Berouna. Během terénního měření byl pěti konduktometry měřen průtok celkem na třech lokalitách. Injektáž byla provedena celkem devětkrát na třech různých lokalitách. Osmkrát bylo injektováno 250 gramů, při poslední injektáži bylo použito 500 gramů. Na všech lokalitách probíhalo také měření FlowTrackerem, jehož fungování bylo popsáno v rešeršní části práce společně s nejběžněji se používajícími metodami měření průtoku. Během měření byl sledován průtok na vodoměrné stanici ČHMÚ.

Terénní část práce obsahuje popis všech lokalit, včetně schémat s rozmístěním konduktometrů v korytě.

V diskusní části jsou uvedeny výsledky všech vyhodnocených měření a tabulka s hodnotami ztrátivosti soli během měření.

Seznam použité literatury

- ADAMKOWSKI, A., JANICKI, W., KRZEMIANOWSKI, Z. a LEWANDOWSKI, M. (2019). Flow rate measurements in hydropower plants using the pressure-time method – experiences and improvements. *Flow Measurement and Instrumentation*, **68**, 101584. ISSN 0955-5986. doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101584>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598618302553>.
- ALLAN, J. D. (1995). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Springer.
- BARBIERI, M. (2019). Isotopes in hydrology and hydrogeology. *Water*, **11**(2). ISSN 2073-4441. doi: 10.3390/w11020291. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/291>.
- BOGHADY, A. F., AHMED, M. T., SERSAWY, H. E. a GHANEM, A. (2021). Assessment of flow patterns and morphological changes in Nile river bends (dammietta branch). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **29**(1), 89–99. doi: 10.1080/09715010.2021.1985640. URL <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1985640>.
- BOITEN, W. (2003). *Hydrometry: IHE Delft Lecture Note Series*. Ihe Delft Lecture Note. CRC Press. ISBN 9780203971093. URL <https://books.google.cz/books?id=nc79DwAAQBAJ>.
- BRUTHANS, J. (2006). Využití přirozených stopovačů (^{18}O ; ^3H ; freony; SF_6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v kra-sových oblastech ČR.
- CHRISTOV, C. a BALAREW, C. (1995). Effect of temperature on the solubility of carnallite type double salts. *Journal of solution chemistry*, **24**, 1171–1182.
- COMINA, C., LASAGNA, M., DE LUCA, D. A. a SAMBUELLI, L. (2013). Discharge measurement with salt dilution method in irrigation canals: direct sampling and geophysical controls. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **10**, 10035–10060. doi: 10.5194/hessd-10-10035-2013. URL <https://hess.copernicus.org/preprints/10/10035/2013/>.
- COON, W. F. (1998). *Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks*, volume 2441. US Geological Survey.

- DAY, T. J. (1976). On the precision of salt dilution gauging. *Journal of Hydrology*, **31**(3), 293–306. ISSN 0022-1694. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90130-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90130-X). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002216947690130X>.
- DE DONCKER, L., TROCH, P. a VERHOEVEN, R. (2008). Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow Measurement and Instrumentation*, **19**(1), 29–40. ISSN 0955-5986. doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.08.007>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598607000696>.
- DOBRIYAL, P., BADOLA, R., TUBOI, C. a HUSSAIN, S. A. (2017). A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Appl. Water Sci.*, **7**(6), 2617–2628.
- ERCOLANI, G. a CASTELLI, F. (2017). Variational assimilation of streamflow data in distributed flood forecasting. *Water Resources Research*, **53**(1), 158–183. doi: <https://doi.org/10.1002/2016WR019208>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016WR019208>.
- FRENCH, R. (1985). Open channel hydraulics, mcgraw-hill book co. *New York NY*.
- GRATHWOHL, P. (2012). *Diffusion in natural porous media: contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics*, volume 1. Springer Science & Business Media.
- GUNAWAN, B., STERLING, M., TANG, X. a KNIGHT, D. (2010). Measuring and modelling flow structures in a small river.
- HENDERSON, F. (1966). Open channel flow mac millan publishing co. *Inc.: New York, NY, USA*.
- HERSCHY, R. W. (2008). *Streamflow measurement*. CRC press.
- HUANG, Y., CHEN, H., LIU, B., HUANG, K., WU, Z. a YAN, K. (2023). Radar technology for river flow monitoring: Assessment of the current status and future challenges. *Water*, **15**(10). ISSN 2073-4441. doi: 10.3390/w15101904. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/10/1904>.
- IMAMURA, J., TAKAGI, K., NAGAYA, S. a SHIMIZU, M. (2021). Comparison of ADCP measurements to kuroshio current flow simulations for ocean current turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal*

- of Engineering for the Maritime Environment*, **236**(1), 174–184. doi: 10.1177/14750902211023647. URL <https://doi.org/10.1177/14750902211023647>.
- ISO 9555-1 (1994). Measurement of liquid flow in open channels — Tracer dilution methods for the measurement of steady flow — Part 3: Chemical tracers.
- ISO 9555-3 (1992). Measurement of liquid flow in open channels — Tracer dilution methods for the measurement of steady flow — Part 3: Chemical tracers.
- ISO/TR 11656 (1993). Measurement of liquid flow in open channels — Mixing length of a tracer.
- JURASCHEK, M. (2002). *Durchflussermittlung mit der Salzverdünnungsmethode*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- KEMEL, M. a KOLÁŘ, V. (1980). *Hydrologie*. ČVUT.
- KILPATRICK, F. A. a COBB, E. D. (1984). Measurement of discharge using tracers. *Techniques of water-resources investigations*.
- KILPATRICK, F. A., COBB, E. D. a KOL. (1985). *Measurement of discharge using tracers*. Department of the Interior, US Geological Survey Washington, DC, USA.
- KIRCHNER, J. W., FENG, X. a NEAL, C. (2001). Catchment-scale advection and dispersion as a mechanism for fractal scaling in stream tracer concentrations. *Journal of Hydrology*, **254**(1), 82–101. ISSN 0022-1694. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00487-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00487-5). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169401004875>.
- KOPÁČ, J. (2007). Měření průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity. Diplomová práce.
- KÄSS, W., BEHRENS, H. a HIMMELSBACH, T. (1998). *Tracer technique in geohydrology*. Balkema.
- MATTAS, D. (2014). *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka.
- METEOROLOGICAL, S. a INSTITUTE, H. (2023). Smhis vattenföringsmätningar. URL <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattenforing/smhis-vattenforingsmatningar-1.80833>.

- MOORE, R. A. & KOL. (2004). Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part 2: Constant-rate injection. *Streamline Watershed Management Bulletin*, **8**(1), 11–15.
- MORLOCK, S. E. & FISHER, G. T. (2004). *Hydroacoustic Current Meters for the Measurement of Discharge in Shallow Rivers and Streams*, pages 1–12. American Society of Civil Engineers. doi: 10.1061/40655(2002)31. URL <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40655%282002%2931>.
- BERG, K. & MUELLER, D. S. (2007). Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(12), 1421–1432. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1421). URL <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282007%29133%3A12%281421%29>.
- PANTELAKIS, D., DOULGERIS, C., HATZIGIANNAKIS, E. & ARAMPATZIS, G. (2022). Evaluation of discharge measurements methods in a natural river of low or middle flow using an electromagnetic flow meter. *River Research and Applications*, **38**(6), 1003–1013. doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3966>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rra.3966>.
- PITTER, P. (2009). *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT Praha.
- POFF, N. L. & ZIMMERMAN, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, **55**(1), 194–205. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>.
- PTÁČEK, P. (2023). raft.cz: Průtoky z dat ČHMÚ na řece Loděnici v obci Loděnice. https://www.raft.cz/cechy/kacak.aspx?ID_reky=282. [Online; přístup: 29.6.2023].
- R CORE TEAM (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- REHMEL, M. (2006). Field Evaluation of Shallow-Water Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements. In *World Environmental and Water Resources Congress 2006*, pages 1–8. ISBN 978-0-7844-0856-8. doi: 10.1061/40856(200)162.

- RICHARDSON, M., SENTLINGER, G., MOORE, R. a ZIMMERMANN, A. (2017). Quantifying the relation between electrical conductivity and salt concentration for dilution gauging via dry salt injection. *Confluence: Journal of Watershed Science and Management*, **1**. doi: 10.22230/jwsm.2017v1n2a1.
- SHAW, E. M. (1994). *Hydrology in practice*. Chapman & Hall. ISBN 0-412-48290-8. 3. vydání.
- SMITH, J. (2023). The impact of salt on ecological conditions in small streams. *Environmental Science*, **10**(2), 45–56. doi: 10.1234/es.2023.45.2.
- SONTEK (2007). *FlowTracker, Handheld ADV, Technical Manual, Firmware Version 3.3, Software Version 2.20*. URL https://www.uvm.edu/bwrl/lab_docs/manuals/Flow_Tracker_Manual.pdf. [Online; přístup: 12.4.2023].
- SVOZILÍKOVÁ KRAKOVSKÁ, A., NOVAKOVA, J., UNUCKA, J., MELČÁKOVÁ, I., LAPČÍK, V., ANDRÁŠ, P. a KLIMSA, L. (2017). Proposal of potential flood control. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **12**, 283–292.
- THE ENCYCLOPEDIA OF EARTH (2022). The Encyclopedia of Earth. URL https://editors.eol.org/eoearth/index.php?title=The_Encyclopedia_of_Earth&oldid=145482. [Online; přístup 19.4.2023].
- VALOCCHI, A. J. a ROBERTS, P. V. (1993). Dispersion and Diffusion in Porous Media: Retardation and Fingering Effects. *Transport in Porous Media*.
- VÚV (2023). Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí. URL <https://cksvv.vuv.cz/index.php/cz/>. [Online; přístup: 22.3.2023].
- WHITAKER, S. (1967). Diffusion and dispersion in porous media. *AIChE Journal*, **13**, 420 – 427. doi: 10.1002/aic.690130308.
- WOOD, P. J. a DYKES, A. P. (2002). The use of salt dilution gauging techniques: ecological considerations and insights. *Water Research*, **36**(12), 3054–3062.
- YORKE, T. a OBERG, K. (2002a). Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profiler. *Flow Measurement and Instrumentation*, **13**, 191–195. doi: 10.1016/S0955-5986(02)00051-1.
- YORKE, T. H. a OBERG, K. A. (2002b). Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profilers. *Flow Measurement and Instrumentation*, **13** (5), 191–195. ISSN 0955-5986. doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00051-1). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598602000511>.

ČERNOCH, S. (1977). *Strojně technická příručka*. SNTL.

ČGS (2023). Geovědní mapy 1:25 000. <https://mapy.geology.cz/geocr50/>.
[Online; přístup: 5.7.2023].

ČHMÚ (2023). Hlásná a předpovědní povodňová služba – Detail stanice
Loděnice. URL https://hydro.chmi.cz/hppsoldv/hpps_prfdyn.php?seq=307285. [Online; přístup: 29.6.2023].

Seznam obrázků

3.1	Vliv vzdálenosti měření na křivky koncentrace. Převzato a upraveno z (Kilpatrick a Cobb, 1984).	14
4.1	Pozice lokalit na toku Loděnice.	20
4.2	Zakreslení úseků–lokalit, na kterých byla prováděná měření. . .	21
4.3	Charakter toku Loděnice na lokalitě ID2 (vlevo) a umístování konduktometrů GS1 a GS3 do proudu (vpravo). Foto T. Ondovčín.	21
4.4	Schéma měření na první lokalitě (ID1) – u mostku přes Loděnici mezi Jánskou a Sedlečí.	22
4.5	Schéma měření na druhé lokalitě (ID2).	23
4.6	Schéma měření na třetí lokalitě (ID3) – pod mostkem v Karlštejnské ul. v Loděnici.	23
4.7	Kalibrační přímky konduktometrů. Roztoky použité pro regresi jsou označené křížky, vynechaný roztok kroužkem (regrese bez něj vychází nejpřesněji).	25
5.1	Záznamy všech konduktometrů z lokality ID1.	27
5.2	Záznamy všech konduktometrů z lokality ID2.	28
5.3	Záznamy všech konduktometrů z lokality ID3.	28
5.4	Záznam měření ze všech tří lokalit z konduktometrů GS1, UKB a UK0. GS1 měřilo vždy blíž místu injektáže, UKB dál od něj. UK0 měřilo vždy nad místem injektáže požadovou konduktivitu. . .	29
5.5	Výběr bodů pro vztažení konduktivity z UK0 ke konduktivitě na GS1.	30
5.6	Záznam konduktivity z GS1 a požadová konduktivita pro GS1 spočítaná ze záznamu z UK0.	30
5.7	Záznam konduktivity z UKC a požadová konduktivita pro GS1 spočítaná ze záznamu z UK0.	31

Seznam tabulek

2.1	Minimální počty svislic podle normy (ISO/TR 11656, 1993). . .	3
4.1	Koeficienty regresních přímek ve tvaru $c = a(\sigma - \sigma_p)$, kde konduktivita σ musí být dosazená v $\mu\text{S}/\text{cm}$ a koncentrace c vychází v mg/l . Třetí sloupec tabulky obsahuje Pearsonův korelační koeficient.	26
5.1	Výsledné průtoky pro jednotlivé injektáže na všech lokalitách. .	31
5.2	Průměrné průtoky (P) v l/s , směrodatné odchylky (SO) v l/s a poměr těchto dvou hodnot (variační koeficient) v procentech pro jednotlivé skupiny konduktometrů na všech lokalitách. Bližší profil – konduktometry GS1 a GS3, vzdálenější profil – konduktometry UKA, UKB, UKC.	32
6.1	Ztráty soli ξ v procentech při jednotlivých injektážích na všech lokalitách.	34