

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství

Studijní obor: Agroekologie

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Bodové měření průtoku vody v povrchových tocích pro zpřesnění
kontinuálního monitoringu průtoku**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Bystřický, Ph.D.

Autor diplomové práce: Bc. Ondřej Šebor

České Budějovice, 2014

Zadání DP

Prohlášení:

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce.

Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 25. 4. 2014

.....

Ondřej Šebor

Poděkování:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je rozdělena na literární rešerši a na praktickou část. Obsahem literární rešerše je problematika odtoku a průtoku, metody měření průtoku a nejistoty měření. V praktické části diplomové práce je popsáno zpracování konkrétního měření průtoků na Kopaninském a Jenínském potoce. Je zde srovnání měření průtoku objemovou metodou s kontinuálním měřením. Výsledky praktické části práce posloužily ke zpřesnění srážko-odtokových procesů na výzkumných povodích. Zpřesněné hodnoty průtočného množství zde sloužily jako vstupní data pro výpočet součinitele odtoku a ke kvantitativnímu vyjádření ztrát živin z jednotlivých povodí. Výpočty součinitele odtoku a odnosu živin byly porovnány za původní a zpřesněné rovnice konzumpční křivky. Objemovým měřením průtoků bylo prokázáno, že vlivem rozdílných podmínek nad přepadem dochází u kontinuálního monitoringu k nejistotám měření, proto se musí ke každému měření průtoku přistupovat individuálně a zvážit situaci na konkrétním místě instalace.

Klíčová slova: měření průtoků, kontinuální měření, měrný přepad, objemové měření průtoku, součinitel odtoku, konzumpční křivka.

ABSTRACT

The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part includes issues associated with runoff and discharge, methods for discharge measurement and measurements of uncertainties. The practical part of the thesis describes a specific process flow measurement in Kopaninský and Jenínský stream. There is a familiarization with the water flow velocity measurement and comparison methods of volume measurement discharge with continuous measurement. The results of the practical part served to refine the rainfall-runoff processes in research catchment areas. Refined values of the flow rate were used as input data for the calculation of the runoff coefficient and for quantifying the losses of nutrients from the catchment areas. Calculation of the runoff coefficient and nutrient losses were compared for the original and the revised equation discharge curve. Volume measurement discharge has shown that the different conditions above measurement weir during continuous monitoring lead to the uncertainties of measurement. That's why one has to approach to each flowmeasurement individually and consider the situation in a particular installation.

Key words: discharge measurement, continuous measurement, measuring weir, volume measurement discharge, coefficient of runoff, discharge curve.

OBSAH

1.	ÚVOD	9
2.	LITERÁRNÍ PŘEHLED	10
2.1	Odtok	10
2.1.1	Základní odtok	10
2.1.2	Podpovrchový odtok	10
2.1.3	Povrchový odtok	10
2.1.4	Činitelé ovlivňující odtok	11
2.2	Pohyb vody v otevřeném korytě	11
2.3	Průtok	12
2.4	Druhy měření průtoku	12
2.4.1	Měření průtoků do nádoby	13
2.4.2	Měření průtoků pomocí přelivů a měrných žlabů	14
2.4.3	Bodové měření rychlostí proudění vody	18
2.5	Přesnost měření průtoků	25
2.5.1	Hydrometrická vrtule	26
2.5.2	Měření ultrazvukem	27
3.	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	29
4.	MATERIÁL	30
4.1	Povodí kopaninského toku	30
4.1.1	Subpovodí P52	31
4.2	Povodí Jenínského toku	32
4.2.1	Subpovodí J1	33
4.2.2	Subpovodí J2	34
5.	METODY	36
5.1	Kalibrace měrných přepadů	36
5.2	Analýza odchylky v odtokovém množství	38
5.3	Kvantitativní vyjádření ztrát živin z povodí	39
6.	VÝSLEDKY A DISKUSE	41
6.1	Kalibrace měrných přepadů	41

6.2	Analýza odchylky v odtokovém množství	47
6.3	Kvantitativní vyjádření ztrát živin z povodí.....	51
7.	ZÁVĚR	57
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	58

1. ÚVOD

Pokrok v měřicí technice a její větší dostupnost přinesly výstavbu nových srážkoměrných a průtokoměrných stanic. Data přenášená z hydrometeorologické sítě se využívají především pro operativní řízení vodohospodářských soustav a pro hodnocení aktuálního povodňového nebezpečí.

Řešení odtoku z malých lesnických a zemědělských povodí a jeho měření je problém, kterým se zabývá současná hydrologie. Právě zpřesňování měření průtoků, zvláště pak měření popř. simulace povodňových vln jsou faktory, které nám pomohou poskytnout informace o chování daného povodí (MATOUŠEK, 2010).

Měření průtoků na drobných tocích podléhá určitým specifikům. Jelikož jsou tyto toky součástí přírody, setkáváme se na nich s nejrůznějšími problémy, které jsou spojeny právě s přirozeným vývojem koryta (turbulentní proudění, nepravidelné geometrie koryta, nebo množství vegetace a jiných přírodních překážek v rámci toku i jeho okolí). V návaznosti s těmito problémy byla vyvinuta pro tato měření celá řada metod s různou přesností.

Při kontinuálním měření průtoků na měrných přepadech dochází při použití univerzálních rovnic často k chybným výsledkům vzhledem k rozdílným podmínkám nad přepadem. Nejčastěji osazovaným způsobem měření průtoků jsou měrné profily ve spojení se snímáním hladiny ultrazvukovou sondou. Existují však situace, kdy tento zaběhnutý způsob není zrovna optimálním řešením a může přinášet problémy a nepřesné hodnoty.

Cílem práce je seznámit s danou problematikou, a provést vyhodnocení přesnosti ultrazvukového měření průtoků na měrných přepadech osazených na uzávěrových profilech jednotlivých výzkumných povodí.

2. LITERÁRNÍ PŘEHLED

2.1 Odtok

2.1.1 Základní odtok

Základní odtok představuje část celkového odtoku z území k určitému profilu na povrchovém toku, který je tvořen dotací z podzemních vod. Z této definice vyplývá, že představuje pouze část odvodnění z hydrogeologické struktury. Kromě základního odtoku jsou do procesu odvodnění zahrnuty i další složky, např. ztráty evapotranspirací, přetékání přes hranice struktury, antropogenní vlivy (čerpání zdrojů podzemních vod).

2.1.2 Podpovrchový odtok

Podpovrchový - hypodermický odtok je složka celkového odtoku, která stéká do koryta toku v bezprostřední vrstvě pod povrchem bez toho, aby dosáhla na hladinu podzemní vody. Jde tedy o vodu, která po infiltraci srážek odtéká nenasatovanou zónou, tedy v době sucha nezvodněným horninovým prostředím, a dotéká s určitým časovým posunem k příslušné erozní bázi (nejčastěji povrchovému toku). Hypodermický odtok je časově omezenou událostí související se srážkou, nebo srážkovým obdobím (např. velmi vlhkým rokem) (NOVOTNÁ, 2012).

2.1.3 Povrchový odtok

Povrchový odtok je gravitační pohyb vody hydrografickou mikrosítí po svahu a soustředěný odtok vody vodními toky. V zásadě lze rozlišit tři fáze povrchového odtoku (SKLENIČKA, 2003).

1. Fáze bezodtoková

Intenzita deště je menší než intenzita infiltrace, průměrná výška deště na povodí je menší než retenční schopnost povodí. Pod pojmem retenční schopnost povodí rozumíme dočasné zadržení vody na vegetaci a objektech (předmětech) v povodí, zadržení vody v povrchové vrstvě povrchu půdy (posklizňové zbytky, lesní hrabanka apod.), v půdě, v mikrodepresích, poldrech a nádržích (SOUKUP A HRÁDEK, 1999).

2. Fáze plošného (svahového) odtoku

Nastává po fázi bezodtokové. Intenzita deště je větší než intenzita infiltrace, průměrná výška deště na povodí je větší než retenční schopnost povodí nebo je retenční kapacita již naplněna. V procesu odtoku se uplatňuje především povrchový a hypotermický odtok (SOUKUP A HRÁDEK, 1999).

3. Fáze soustředěného odtoku

Nastává při postupném soustředování odtoku do hydrografické sítě v povodí, v recipientu (v údolnici) se uplatňují všechny složky celkového odtoku (SOUKUP A HRÁDEK, 1999).

2.1.4 Činitelé ovlivňující odtok

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

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

2.2 Pohyb vody v otevřeném korytě

Pohyb vody v otevřeném korytě se děje podle zákonů známých z hydrauliky. V přirozených tocích se průtoky neustále mění v závislosti na časově proměnlivém odtoku srážkových vod z povodí, proměnlivé dotaci ze zásob podzemních vod apod. Z hlediska hydraulického se v přirozeném toku nejčastěji vyskytuje pohyb neustálený/nestacionární, nepermanentní. Jen poměrně v krátkých časových obdobích, kdy se průtok prakticky nemění, můžeme mluvit o pohybu ustáleném/stacionárním, permanentním. Ten u přirozených toků bývá zpravidla nerovnoměrný v důsledku proměnlivého sklonu, příčného průřezu i drsnosti koryta. Jen v krátkých úsecích jsou někdy přibližně splněny při ustáleném režimu podmínky pro vznik pohybu rovnoměrného (KEMEL, 1994).

2.3 Průtok

Průtok, průtočné množství

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

Pozn.: Synonymnímu termínu **průtočné množství** odpovídá definice (2) (ČSN 75 0101, 2003).

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

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

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

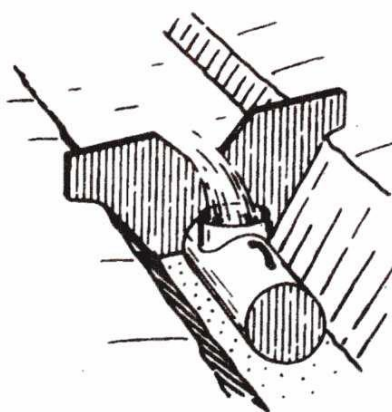
(KUNSTÁTSKÝ A PATOČKA, 1966).

2.4 Druhy měření průtoků

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

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

2.4.1 Měření průtoků do nádoby



Obr. 1. - Objemové měření kalibrovanou nádobou, Zdroj: (JENÍČEK, 2011).

Podle Pelikána a kol., (1988) se dělí objemové měření na spojitě a nespojitě. Objemová měřidla se spojitým měřením přecházejí ihned po naplnění jednoho objemového množství na plnění dalšího, čímž je umožněno průběžné měření průtoků. Tato měřidla dále dělíme na měřidla s otevřenými měrnými prvky (objemová měřidla kyvná a bubnová), nebo s uzavřenými měrnými prvky (objemová měřidla lamelová, segmentová, pístová, prstencová, s eliptickými koly a s komorovým bubnem). Nespojitá objemová měření jsou oproti spojitým jednoduchá, protože se měří doba, za kterou nateče předem známý objem.

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

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

$$Q = V/t$$

Kde V je objem zachycené vody,

t - čas, po který jsme vodu odebírali.

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

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

2.4.2 Měření průtoků pomocí přelivů a měrných žlabů

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

Měrné přelivy se používají v různých provedeních a s rozdílnými tvary výřezu. Existují typy ostrohranné nebo typy s krátkou či širokou korunou. Ostrohranné přelivy sestávají ze stěny umístěné napříč korytem s různě vytvarovaným výřezem, přičemž návodní hrana stěny přelivu musí být ostrá. (KŘÍŽ A KOL., 1979).

Podle konstrukce přelivné hrany rozlišujeme tyto základní typy ostrohranných přelivů:

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

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

- kruhový přeliv,
- parabolický přeliv aj.,

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

Typy měrných žlabů:

- Parshallův žlab,
- Venturiho žlab.

Bazinův přeliv

Bazinův přeliv je klasickým a zřejmě nejlépe prozkoumaným přelivem. Je obdélníkového tvaru, bez boční kontrakce.

Pro stanovení průtoku Bazinovým přelivem se užívá rovnice:

$$Q = mb\sqrt{2gh^{3/2}}$$

Kde Q je průtok

h - výška vodního paprsku (přepadová výška)

B - šířka přítokového koryta

g - gravitační zrychlení

Kde pro stanovení součinitele přepadu m existuje celá řada vzorců (Bazinův, Rehbockův, SIA). Pokud snižujeme konstrukční výšku přelivu s nebo naopak zvětšujeme přepadovou výšku, dojde v určitém rozmezí průtoku ke kvalitativní změně z proudění přes přeliv na proudění přes nízký práh (MATTAS, 1998).

Ponceletův přeliv

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

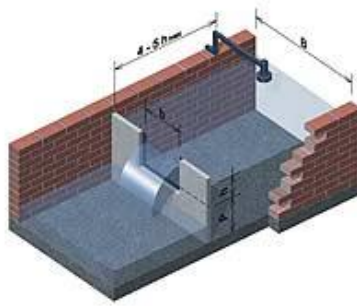
$$Q = a \cdot h^{1,5}$$

Kde Q je průtok

h - výška vodního paprsku (přepadová výška)

a - velikost otevření pod stavidlem.

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



Obr. 2. - Ponceletův přeliv, Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

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

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

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

Kde a - velikost otevření pod stavidlem,

B - šířka přítokového koryta,

g - tíhové zrychlení a

μ - součinitel výtoku zahrnující ztráty na výtoku, hodnotu kontrakčního součinitele, Coriolisovo číslo a hodnotu rychlostní výšky.

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

Thomsonův přeliv (přepad)

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

$$Q = a \cdot h^{2,5}$$

Kde Q je průtok

h - výška vodního paprsku (přepadová výška)

a - velikost otevření pod stavidlem.

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



Obr. 3. - Thomsonův přeliv, Zdroj: (PARS AQUA, 2009)

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

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

Kde Q je průtok

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

h - výška vodního paprsku (přepadová výška)

g - gravitační zrychlení (KŘÍŽ A KOL., 1979).

Měrné žlaby

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

Parshallův žlab

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

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

Venturiho žlab

(Rozšířená nejistota měření +/- 7 %)

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

2.4.3 Bodové měření rychlostí proudění vody

Rozdělení rychlostí v průtočném průřezu

Plochu průtočného průřezu měříme běžnými geodetickými způsoby. Střední průřezovou rychlost stanovíme z měřených hodnot bodových rychlostí Pitotovou trubicí, hydrometrickou vrtulí nebo z povrchových rychlostí měřených plováky, popř. výpočtem podle empirických vzorců. Rozdělení rychlostí v průtočném průřezu je nerovnoměrné. Maximální rychlost je pod hladinou v hloubce asi $0,75 - 0,8 h$ (od dna), od níž směrem k hladině (vlivem tření o vzduch) i ke dnu ubývá. Rozdělení rychlostí ve svislici lze v prvním přiblížení vyjádřit parabolou s vrcholem v místě maximální rychlosti (BEZDÍČEK, 1966).

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

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

Stanovení průtoků z měřených rychlostí

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

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

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

2.4.3.1 Měrné plováky

Plováku se používá výrazně barevného dřevěného kotouče, lahve nebo jiných plovoucích předmětů. Pro měření se vybere rovný úsek koryta se stálou velikostí průtočného průřezu., ve kterém se mezi dvěma průtočnými profily I a II vymezí dráha délky l . Plovák se vhodí do vody nad profilem I, aby nabyl stejné rychlosti jako voda, a na stopkách nebo přesných hodinkách změříme dobu t , za kterou prošel vzdálenost l mezi oběma profily.

$$v = l/t$$

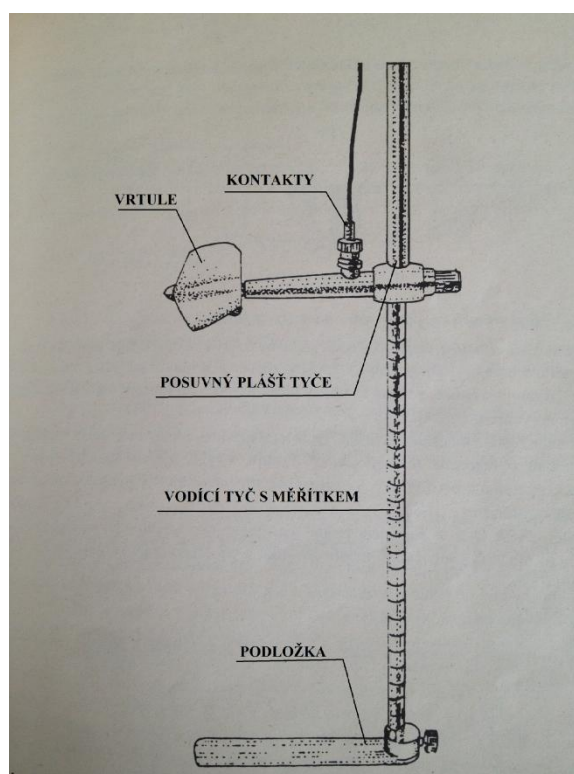
Při měření plovákem zjistíme rychlost povrchovou, nikoliv rychlost střední, kterou bychom potřebovali znát pro výpočet průtoku ze vztahu:

$$Q = v \cdot F$$

K odstranění tohoto nedostatku se někdy používá hlubinných plováků ve tvaru dřevěné, nebo duté kovové tyče, která je na konci zatížena a plove ve svislé poloze. Má být ponořena co nejvíce ke dnu, aby vyrovnávala rozdíly v rychlosti, nesmí však při pohybu narážet na dno (ŠILAR, 1996).

2.4.3.2 Hydrometrické vrtule

Měření rychlosti hydrometrickou vrtulí je v současné době asi nejběžnější metoda. Hydrometrická vrtule se skládá z propelleru, těla vrtule, tyče a čítače otáček (obr. 4.) (BUMERL,2003).



Obr. 4. – Hydrometrická vrtule, Zdroj: (ŠILAR, 1996)

Otáčející se osa vrtule spíná přímo (mechanicky, magneticky, opticky, příp. i jinak) nebo přes šnekový převod (mechanicky) kontakt, který ovládá počítadlo otáček (nebo u starších typů akustické signalizační zařízení – bzučák). Počítadlo se k vrtuli připojuje kabelem. Moderní vrtule zpravidla dávají jeden impuls na každou otáčku. Některé typy vrtulí, zejména speciální vrtule pro laboratorní použití (tzv. mikrovrtule s průměry propelerů pod 25-30 mm), dávají i více než jeden (laboratorní vrtule Delft např. 60) impulsů na otáčku, takže lze do jisté míry sledovat

i parametry turbulence. Ze známého času a počtu otáček se pak z kalibrační rovnice určuje rychlost proudění. Existuje však i vrtule, u které propeler otáčí dynamem, takže výstupem nejsou impulsy, ale napěťový signál úměrný rychlosti (MATTAS, 2001).

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

Podle rychlosti proudu a hloubky vody se užívají různé typy propelerů, které se liší velikostí (průměrem, délkou a stoupáním). Tvar a velikost propeleru určuje možnost využití hydrometrických vrtulí pro různé rychlosti.

Pomocí hydrometrické vrtule můžeme měřit skutečnou rychlost v přesně určeném bodu. Hydrometrická vrtule musí být kalibrovaná, což u nás provádí VÚV TGM v Praze (BUMERL, 2003).

Při měření určíme počet otáček N , za zvolený interval T . Rychlost proudění v , v bodě se vypočítá z kalibrační rovnice vrtule. Ta je předepsána v (ČSN ISO 3455).

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

Kde α_i, β_i jsou kalibrační konstanty vrtule,
 n - frekvence otáček vodoměrné vrtule.

$$n = T/N$$

Kde N jsou otáčky rotoru,
 T - doba.

Konstanta α_i závisí na citlivosti vrtule, tj. na vlastnostech ložisek, a je to v podstatě nejnižší rychlost vody, při níž se vrtule uvede do pohybu. Konstanta β_i závisí na stoupání šroubové plochy vrtule. (ŠILAR, 1996)

2.4.3.3 Ultrazvukové průtokoměry

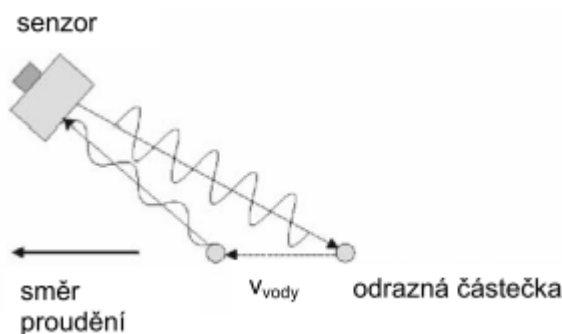
Ultrazvukové měření průtoků je nepřímou metodou, tzn. že průtok je vypočítán na základě rovnice kontinuity z měření průřezové rychlosti a průtočné plochy přiřazené měřenému vodnímu stavu. Pro měření rychlosti ultrazvukem se v praxi uplatňují tři principiálně odlišné metody:

- Metoda ultrazvukového dopplerovského měření (dopplerovská)
- Metoda ultrazvukového diferenčního měření (diferenční)
- Metoda „sing-around“ (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001).

Metoda ultrazvukového dopplerovského měření (dopplerovská)

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

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



Obr. 5. – Princip Dopplerovského měření, Zdroj: (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001).

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

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

Kde f je vysílaná frekvence

C_0 - naměřená průměrná rychlost zvuku

V_p - rychlost částic

α - úhel přenosu mezi ultrazvukem a směrem proudění (RIYAZ, STEFFEN, 2002).

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Jak už název napovídá, tento přístroj také využívá Dopplerova jevu a pracuje na velmi podobném principu. Pomocí sonaru, který generuje a detekuje ultrazvuk, se zaznamenává rychlost proudění vody v profilu toku. Celá souprava se skládá ze čtyř komponent: čidlo (sonda), plastový plovák katamaránové konstrukce,

komunikační modem s online přenosem a počítač s aplikací WinRiver (vše je plně automatizováno a výpočet je proveden počítačem. Plastový plovák bývá tažen přes tok po laně nebo systémem lanovky. Ideální využití přístroje je na vodních tocích s hloubkami 0,3 - 50 metrů s rychlostí proudění až do 20 m.s^{-1} . Z pohledu metodiky měření průtoků na drobných tocích je tedy tato metoda použitelná spíše na relativně větších vodních tocích, a to na tocích s relativně pravidelnou geometrií koryta a nezarostlých vegetací. Tato metoda je poměrně přesná a hlavně velmi rychlá, měření i jeho vyhodnocení je hotové za krátkou dobu a nemusí se přemísťovat po toku (JENÍČEK, 2011).

LDA

LDA neboli laser Doppler anemometry. Je to bezkontaktní optická metoda, dokáže měřit až tři složky rychlosti, je vysoce přesná, má vysoké prostorové rozlišení (dokáže změřit rychlost prakticky v jednom bodě), jedná se o absolutní způsob měření, tedy není třeba provádět kalibraci. Dokáže měřit i záporné a nulové rychlosti, dovede rozlišit i fluktuaci rychlosti v řádu kHz.

Metoda LDA funguje tak, že nejprve je laserový paprsek rozdělen na paprsky o stejné intenzitě. Paprsky jsou pak nasměrovány do optických vláken, odkud jsou vedeny do optiky sondy. Ohnisková vzdálenost předních čoček sondy určuje velikost a pozici bodu křížení obou paprsků. Optika je použita k nasměrování paprsků do místa, ve kterém chceme provádět měření. Zkřížením paprsků se nám vytváří měřící objem ve tvaru elipsoidu, kde dochází ke vzniku interferenčních proužků. Mezery mezi proužky jsou dány vlnovou délkou laseru a úhlem mezi oběma paprsky. V proudu média jsou obsaženy drobné částice. Když tyto částice projdou skrz měřený objem, dojde k rozptylu světla dle Dopplerova efektu. Kolísání síly rozptýleného světla pak závisí na velikosti rychlosti pohybující se částice. Poté se poměrně snadno dá vypočítat rychlost částice z jednotky času, za kterou částice překoná vzdálenost mezi interferenčními proužky (DURST A KOL., 1981)

Metoda ultrazvukového diferenčního měření (diferenční)

Princip měření se zakládá na přímém měření doby průchodu akustického signálu mezi dvěma ultrazvukovými senzory (elektro-akustickými měniči). Zvuková vlna, která se ve vodě šíří proti směru proudění, potřebuje k překonání měrné vzdálenosti delší dobu, než zvuková vlna šířící se ve směru proudění. Vzniklý časový rozdíl je přímo úměrný rychlosti proudění v měrné dráze, respektive při znalosti

geometrie koryta a směru proudění přímo úměrný průtok. U průtočných profilů s volnou hladinou je průtočná plocha závislá na hloubce, proto musí být pro stanovení geometrie profilu vždy měřen také vodní stav.

S ohledem na geometrii průtočného profilu se přijímají vhodné zjednodušující předpoklady, jejichž platnost musí být potvrzena kalibračním měřením. Měření doby průchodu signálu mezi senzory je realizováno různými způsoby, např. metoda frekvenčních pásem a metoda impulsní. Při metodě frekvenčních pásem je do vody vyslán definovaný sled frekvencí, metoda impulsní uplatňuje krátkodobý ultrazvukový impuls o jedné frekvenci (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001).

„Sing-around“ princip

Krátký ultrazvukový impuls generovaný vysílačem proběhne definovanou měrnou dráhu. Další impuls se uvolní vzápětí po příjmu pomocí zpětného elektronického propojení mezi vysílačem a přijímačem. Ultrazvukové impulsy je možné zachytávat po určitou, libovolně dlouhou dobu, čímž se získá oběhová frekvence, která je úměrná rychlosti šíření ultrazvuku, potažmo rychlosti proudění v měrné dráze. Tento „sing-around“ princip je přednostně uplatňován v senzorech pro bodové měření rychlosti (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001).

2.4.3.4 Měření průtoků pomocí indikátorových metod

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

Vzdálenost mezi profilem aplikace a měrným profilem je podmíněna charakterem a šířkou proudu. Podstatné je, aby bylo před měrným profilem dosaženo dokonalého promísení traceru s proudem, tzn. vzdálenost byla delší, než směšovací délka (BOITEN, 2000).

Čím je tedy proud turbulentnější a užší, tím kratší může být úsek mezi profilem aplikace a měrným profilem. Pokud je úsek neúměrně dlouhý, je možné zvolit dávkování traceru ve více bodech příčného profilu aplikace a tak zkrátit směšovací délku. Pokud projde měrným profilem veškeré aplikované množství

traceru a za podmínky konstantního průtoku během průchodu tracerového mraku měřeným úsekem, resp. profilem, můžeme psát:

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

Kde M je množství traceru v aplikovaném roztoku (mg)

V - objem aplikovaného roztoku traceru

c - konduktivita roztoku traceru (ADRIAN, 1991).

Při měření průtoku pomocí stopovačů (tracer) se průtok určuje podle míry ředění injektovaného traceru. Do vodního toku je injektováno známé množství traceru. Lze vypočítat, jaké množství vody je nutné k tomu, aby se toto množství zředilo na koncentraci, již měříme. V podstatě se jedná o obdobu kvantitativní stopovací zkoušky. S tím rozdílem, že při stopovací zkoušce je měřen průtok a zjišťuje se návratnost traceru, zatímco při této metodě se považuje návratnost traceru za rovnou 100% a hledá se neznámá hodnota průtoku. (BRUTHANS, 2006)

Požizovací hodnota traceru je zanedbatelná, je snadno dostupný. Jeho aplikace má minimální vliv na životní prostředí. Další podstatnou výhodou je dostupnost in-line analytické techniky s digitálním záznamem s vysokým časovým rozlišením, který je poměrně nenákladný, kompaktní a vhodný i do těžkého terénu.

Použití indikátorové metody sebou nese řadu ulehčení. Tím nejpodstatnějším je skutečnost, že není potřeba znát geometrii úseku ani jeho drsnosti. Lze ji použít kdekoli, kde situace neumožňuje tradiční řešení (pod ledem, při strmých sklonech, při malých průtocích) nebo tam, kde by tradiční měření znamenalo neúměrné náklady. Kritickým bodem aplikace metody je zvýšená hustota roztoku NaCl.H₂O, což může mít vliv na transportní vlastnosti média. Nicméně v plně vyvinutém turbulentním proudění v kvadratické oblasti ztrát třením je tato vlastnost negativní. (ISO 9555, 1994).

2.5 Přesnost měření průtoků

Na přesnost změřeného průtoku působí řada náhodných a na sobě vzájemně závislých i nezávislých vlivů. Nejpřesnějších výsledků se dosahuje objemovým měřením průtoků a dále pomocí hydrometrické vrtule. Nejméně přesné jsou metody využívající neúplných měření a rychlostních vzorců, kde některé parametry se odvozují nepřímou nebo se stanoví odhadem. Na přesnost měření průtoků objemovým způsobem má vliv chyba ve stanovení objemu nádoby (nádrže), jejího naplnění při vlastním měření, chyba použitých stopek a vlastního měření.

Další okolnosti, jako vliv změny teploty a vazkosti vody na přesnost objemového měření má druhořadý význam. Při zachování podmínek měření chyba nepřesahuje $\pm 1\%$. Chyba měření průtoků pomocí dobře konstruovaných přelivů, kde velikost součinitele přepadu se ověří cejchováním, je rovněž menší než $\pm 1\%$. Při malých tloušťkách přepadového paprsku může chyba přesáhnout $\pm 5\%$. Přesnost měření průtoků pomocí žlabů se udává $\pm (2-3)\%$ (CHAMRAD A KOL., 1982).

2.5.1 Hydrometrická vrtule

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

Dále je nutné počítat s chybou hydrometrické vrtule, která se udává do $\pm 1\%$. Největší vliv na přesnost přímého měření průtoků má zjištění průtočné plochy. Chyby zde vznikají především nepřesným měřením hloubek vody v korytech s velkou drsností, případně použitím rozdílných měřících postupů (měření pomocí dělené tyče, na závěsu z lanovky apod.) Chyby ve stanovení průtočné plochy v korytech s kamenitým dnem mohou přesáhnout $\pm 10\%$, naopak v korytech se dnem tvořeným pískem a štěrky chyba nepřesahuje $\pm 5\%$. Rovněž rozmístění měrných a sondovacích svislic může ovlivnit přesnost měření do $\pm 5\%$. Vliv přesnosti měřených šířek na stanovení plochy průtočného profilu se může ve větší míře projevit, jestliže průhyb měrného lanka (pásma) bude dosahovat 10% z šířky profilu, což se při dodržení doporučených postupů prakticky nevyskytuje. Jestliže se dodržují normativní pokyny pro měření průtoků hydrometrickou vrtulí ve vodním toku s volnou hladinou uvedené při popisu měření jednotlivých parametrů, bude střední kvadratická chyba při ustáleném proudění a příznivých podmínkách menší než $\pm 5\%$, v méně příznivých podmínkách chyba bude $\pm (5-10\%)$. Chyby stanovení průtoků pomocnými měřícími metodami a při použití rychlostních vzorců se mohou pohybovat v rozmezí několika desítek procent (KŘÍŽ, 1988).

2.5.2 Měření ultrazvukem

Podle Quantum hydrometrie (1992) jsou zdroje nejistot (chyb) měřeného průtoku ultrazvukem přisouzeny čtyřem následujícím oblastem:

- Výběr měrného profilu - proměnný směr proudění, vzduchové bubliny, plaveniny, led, teplotní vrstvy, přesycení kyslíkem, příliš nízké rychlosti.
- Zřízení a kalibrace měřicího zařízení – nastavení přístrojů, nepřesná nebo chybná referenční měření (v závislosti na uplatněné metodě).
- Provoz měřicího zařízení – rušené nebo poškozené součásti (výpadek elektroniky).
- Vyhodnocení měřených dat – chybné stanovení rušivých vlivů, nedostatečné přizpůsobení referenčních křivek k proměnným okrajovým podmínkám.

Plaveniny

Při šíření ultrazvukového signálu se část mechanické energie ultrazvukového vlnění ztrácí a průběžně se snižuje vlnová amplituda. Ultrazvuková vlna je tak tlumena, což znamená, že intenzita přijímaného signálu je oproti výchozí hodnotě snížena. Přitom klesá jenom amplituda signálu, ostatní parametry, jako např. frekvence, zůstávají nezměněny. Útlum akustické vlny je realizován dvěma hlavními mechanismy – třením a rozptylem.

Tření: Přeměna akustické (mechanické) energie na teplo vzniklé třením v důsledku viskozity vody.

Rozptyl: Při dopadu na pevnou částici (plavenina) plovoucí ve vodě se část akustické energie rozptýlí do okolí. Velmi malé částičky způsobují relativně velkou ztrátu akustické energie v důsledku vlastního rozkmitání od procházejícího akustického vlnění. K dalšímu nárůstu útlumu akustické energie ultrazvukového signálu pak dochází se vzrůstajícím průměrem rozptylných částiček (od průměru asi 0,1 až 1 mm) (LAENEN A KOL., 1983).

Splaveniny dělíme na dvě skupiny:

- Plaveniny – velmi jemné částice, které se ve vodě vznášejí a usazují se při velmi malých rychlostech. Způsobují zanášení koryta, umělých kanálů a nádrží, ale i zúrodnění inundační oblasti řeky
- Dnové splaveniny – hrubší částice, které jsou posouvány po dně (saltací). Způsobují tzv. divočení některých vodních toků, snižují

splavnost, vytvářejí nánosy a mělčiny. Znalost režimu splavenin je důležitá při hrazení bystřin apod.

Podle velikosti se dělí splaveniny do několika skupin: jemný písek 0,06 - 0,25 mm, střední písek 0,25 - 1 mm, hrubý písek 1 - 2 mm, drobný štěrk 2 - 8 mm, střední štěrk 8 - 30 mm, hrubý štěrk 30 - 130 mm, kameny 130 - 250 mm a balvany nad 250 mm (CHMELOVÁ A KOL., 2012).

Vzduchové bubliny

Vzduchové bubliny, které se tvoří například pod jezy při přepadu vtahováním vzduchu do vody, nebo také v důsledku produkce kyslíku vodními rostlinami či uvolňováním kalového plynu, tlumí procházející akustický signál. Z fyzikálního hlediska se jedná o týž efekt, jako při útlumu signálu pevnými částicemi, tedy o tření (přeměnu akustické energie na teplo) a rozptýl. Ale narozdíl od vody a plavenin jsou vzduchové bubliny lehce stlačitelné, což ovlivňuje také rychlost šíření zvuku ve vodě. Pro měřicí zařízení instalovaná na úsecích, které bývají v důsledku silného slunečního záření prosyceny biologickým kyslíkem, je typické, že měření v průběhu dne vypadává (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001)

Teplota a obsah soli

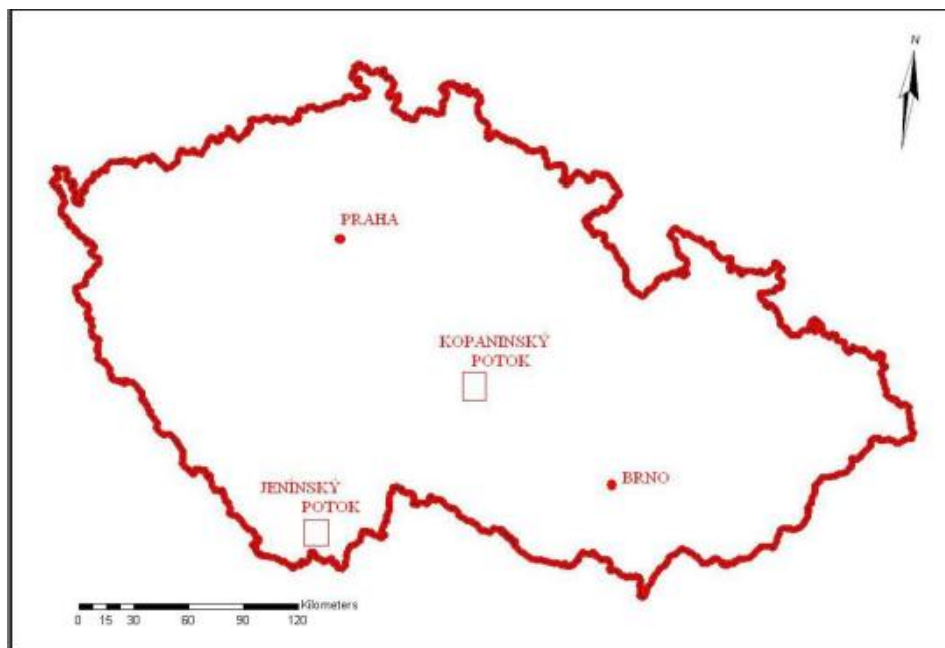
Rychlost ultrazvuku ve vodě je ovlivňována také v důsledku gradientu teploty, nebo salinity. Při velkém rozdílu mezi teplotou vzduch a teplotou vody nastává výměna tepelné energie na styčné ploše - na hladině, což vede k ustavení teplotního gradientu ve vodě. Konečným důsledkem je odklonění dráhy šíření zvukového signálu z jeho normálně přímého směru. V krajním případě může být způsobená odchylka dokonce taková, že vyslaný signál mine přijímač, čímž dojde k výpadku akustického spojení mezi senzory, potažmo k výpadku měření (QUANTUM HYDROMETRIE, 2001).

3. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem práce bylo vyhodnocení přesnosti ultrazvukového měření průtoků na měrných přepadech osazených na uzávěrových profilech jednotlivých výzkumných povodí. Při kontinuálním měření průtoků na měrných přepadech dochází při použití univerzálních rovnic často k chybným výsledkům vzhledem k rozdílným podmínkám nad přepadem. Vhodnost použití těchto univerzálních rovnic bylo třeba v terénu ověřovat bodovým měřením průtoků. Výsledkem práce je verifikace výpočtových vztahů, použití při kontinuálním monitoringu měrného přepadu a navržení nových konzumpčních křivek pro jednotlivé přepady dle výsledků měření získaných bodovým měřením.

4. MATERIÁL

Všechny aktivity spojené s vypracováním diplomové práce byly zaměřeny na dvě lokality, a to povodí Jenínského potoka a Kopaninského potoka. Lokalizace obou povodí v rámci České republiky je uvedena na obrázku 6.



Obr. 6. - Lokalizace studovaných povodí Jenínského potoka a Kopaninského potoka v rámci České republiky, Zdroj: (MORAVERCOVÁ, 2011)

4.1 Povodí kopaninského toku

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

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

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

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

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

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

4.1.1 Subpovodí P52

Na stanovišti P52 je tok osazen kruhovou betonovou skruží, na které je umístěna telemetrická stanice. Před kruhovou skruží je vybudován Thomsonův přeliv (viz obr. 7.).

Tab. 1. - Subpovodí P52

Kategorie využití území	Výměra [ha ⁻¹]	Výměra [%]
Parcela nenalezena v SPI	0.44	0.68
Orná půda	20.30	31.16
Zahrady	0.41	0.63
Louky	0.06	0.09
Pastviny	0.81	1.25
Lesy	41.67	64.29
Vodní plochy	0.17	0.26
Ostatní plochy	1.06	1.64
Celková výměra	64.92	-



Obr. 7. – Odběrný profil P52, Foto: Autor

4.2 Povodí Jenínského toku

Povodí Jenínského potoka (č.h.p. 1-06-01-138) o výměře 4,6 km², leží v katastrálním území obce Jenín a Horní Kaliště. Náleží do správního území obce Dolní Dvořiště, které se nachází v jihovýchodní části okresu Český Krumlov, při hranicích s Rakouskem. Je vymezeno rozvodnicí Jenínského potoka, pravostranného přítoku Rybnického potoka

Řešené území leží v nadmořské výšce 637 – 870 m n. m. s nejvyšším vrcholem povodí Žibřidovský vrch s nadmořskou výškou 870 m n. m., který se nalézá v nejsevernější části povodí.

Zájmové území náleží podle geomorfologického členění Demek (1965) do provincie česká Vysočina, subprovincie Šumavská soustava, oblasti Šumavská hornatina, celku Šumavské podhůří, podcelku Českokrumlovská vrchovina, okrsku

Rožmberská vrchovina. Skalní podklad tvoří zhruba v hranicích Šumavského podhůří odděleného zlomovým pásmem od Kaplické brázdy biotiticko – muskovitické svorové ruly a svory moldanubika s vložkami kvarcitů a kvarcitických rul. Podklad zbylé části území je tvořen převážně vyvřelinami moldanubického plutonu, především biotitickým granodioritem a křemenným dioritem. K nejrozšířenějším typům migmatitu náleží porfyrický granodiorit weinsberského typu a dále biotitický a křemenný diorit (z části porfyrický) freistadtského typu. Čtvrtohorní pokryv tvoří v bezprostředním okolí vodních toků delubiofluviální, převážně písčitohlinité až hlinitopísčité sedimenty, v jejich širším okolí pak nacházíme deluviální a soliflukční sedimenty (SVOBODA, 1964).

Řešené území leží podle Quitt (1971) v klimatické oblasti MT3. Klima mírně teplého okrsku MT3 je charakterizováno krátkým létem (20 – 30 letních dnů), mírným až mírně chladným (průměrná červencová teplota 16 – 17 °C), suchým až mírně suchým (úhrn srážek ve vegetačním období 350 – 450 mm). Mírné jaro i podzim (duben i říjen 6 až 7 °C).

Zima je normálně dlouhá (40 – 50 ledových dnů, 130 – 160 mrazových dnů), mírná až mírně chladná (leden -3 až -4 °C), suchá až mírně suchá (suma srážek mimo vegetační období 250 až 300 mm). Sněhová pokrývka trvá normálně dlouho až krátce (60 – 100 dní).

Převážná část vodoteče je neupravená, vede údolím, které je většinou doprovázeno stromovou a keřovou zelení. Tato niva se většinou nesklízí, vzhledem k vysoké hladině podzemní vody. Travní porost tvoří většinou mokřadní byliny a dřeviny (MORAVCOVÁ, 2011).

4.2.1 Subpovodí J1

Odběrný profil značený J1 je trubní výust' sporadické drenážní skupiny odvodňující pastviny do toku Jenínského toku. Subpovodí má rozlohu 46,8 ha. Uzávěrový profil tohoto subpovodí je osazen Thomsonovým přepadem s pravouhlým výřezem a je vybaven ultrazvukovou sondou pro kontinuální měření a záznam průtoků a výšek hladin. Dále je potom povodí vybaveno automatickým člunkovým srážkoměrem.



Obr. 8. – Odběrný profil J1, Foto: Autor

Tab. 2. - Subpovodí J1

Kategorie využití území	Výměra [ha ⁻¹]	Výměra [%]
TTP – pastvina	40,6	86,7
TTP – louka	5,6	12
Les	0,6	1,3

4.2.2 Subpovodí J2

Odběrný profil značený J2 je trubní výúst' systematické drenážní skupiny odvodňující pastviny do toku Jenínského toku. Subpovodí má rozlohu 55,21 ha. Uzávěrový profil tohoto subpovodí je rovněž osazen Thomsonovým přepadem s pravoúhlým výřezem a je vybaven ultrazvukovou sondou pro kontinuální měření a záznam průtoků a výšek hladin. Tato sestava je doplněna kontinuálním vzorkovačem ISCO 6712 pro automatický odběr vzorků vody v průběhu srážko-odtokových událostí a také automatickou meteorologickou stanicí.



Obr. 9. – Odběrný profil J2, Foto: Autor

Tab. 3. - subpovodí J2

Kategorie využití území	Výměra [ha ⁻¹]	Výměra [%]
TTP – pastvina	43	78
TTP – louka	0,5	0,8
Les	11,6	21
Zastavěná plocha	0,1	0,2

Telemetrická stanice

Všechny tři odběrné profily jsou osazeny telemetrickou stanicí Fiedler – Mágr (M4016). Stanice slouží pro kontinuální měření proteklého množství vody z povodí.

Množství proteklé vody se nejčastěji zjišťuje výpočtem přes konzumpční rovnici z výšky hladiny měřené na vybudovaném měrném profilu. Tím může být např. Parshallův žlab, nebo Thomsonův přeliv. Pro měření výšky hladiny se nejčastěji používá ultrazvukový snímač.

V jednotce M4016 jsou již z výroby naprogramované konzumpční rovnice po devět nejčastěji používaných velikostí Parshallových žlabů a dále konzumpční rovnice pro měrné přelivy, Venturiho žlaby a pro kombinované Parshallovy žlaby. Závislost mezi výškou hladiny a okamžitým průtokem lze zadat tabulkou nebo vyplněním koeficientů standardní konzumpční rovnice.

Ve stanici M4016 se archivují okamžité hodnoty průtoku a zároveň se průběžně počítá celkový proteklý objem. Všechny hodnoty se následně přenášejí prostřednictvím zabudovaného GSM/GPRS modulu do databáze na server (FIEDLER – MÁGR, 2014).

5. METODY

Metodika této diplomové práce je rozdělena do tří částí. První část je zaměřena na kalibraci měrných přepadů objemovou metodou na subpovodích J1, J2 a P52, které jsou osazeny záznamovými jednotkami Fiedler – Mágr (M4016). Cílem této části práce je porovnání bodového měření průtoku s kontinuálním a následným stanovením nové rovnice konzumpční křivky pro Thomsonův přepad.

Druhá část práce je zaměřena na zpracování datových řad měření průtoku zaznamenávajících odtok vody z jednotlivých subpovodí, kde byl proveden výpočet celkového odtoku z povodí před a po kalibraci rovnice měrného přepadu v hydrologických letech 2009 až 2011. Tato data byla poté aplikována v rovnici pro výpočet součinitele odtoku s následným vyhodnocením.

V poslední části je práce zaměřena na kvantifikaci vlivu celkového odtoku na koncentraci a odnos dusičnanového dusíku a celkového fosforu.

5.1 Kalibrace měrných přepadů

Kalibrací měrných přepadů se zabývá katedra krajinného managementu Jihočeské univerzity, pracovníci katedry provádějí na těchto přepadech v průběhu celého roku měření průtoků objemovou metodou. Kalibrování bylo prováděno na měrných přepadech J1, J2 a P52 od září roku 2010 do února roku 2014. Osobně se těchto měření účastním od roku 2011. Kalibrace měrných přepadů byla uskutečněna z důvodného podezření na nejistoty v měření u telemetrických stanic.

Bodové měření objemovou metodou (viz obr. 10.) bylo prováděno velkokapacitním objemovým průtokoměrem, který se sestával ze zádržného vaku o objemu cca 500 litrů, dvou výpustních uzávěrů, hadice a mechanického vodoměru.

Kontinuální měření průtoků probíhá na všech zvolených profilech ultrazvukovými měřiči výšky vodní hladiny (US1200) doplněnými záznamovými jednotkami (M4016) od českobudějovické firmy Fiedler – Mágr. Hodnoty průtoků a výšek hladin jsou zaznamenávány datalogery za normálních odtokových podmínek v desetiminutovém intervalu a v průběhu extrémních srážko-odtokových událostí s minutovým časovým krokem.

K vyhodnocení naměřených dat je využíván tabulkový procesor Microsoft Excel, ve kterém jsou přepočítávány hodnoty vodních stavů z průtokového množství naměřeného telemetrickou stanicí (viz tabulky 4, 5, 6.). Tyto hodnoty byly validovány s naměřenými hodnotami objemového průtokoměru a následně

přepočítávány jako nejistota měření Δ (%). Poté jsou data dosazena do konzumpční křivky měrného přepadu a z ní je odečtena rovnice regrese.

Vlastní měření

Důležité pro měření objemovým průtokoměrem je dle Pelikána a kol. (1988):

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



Obr. 10. – Experimentální měření - odběrný profil J2, Foto: Autor

Doba plnění byla zvolena pomocí telemetrické stanice s ultrazvukovou sondou Fiedler – Mágr (M1045). Vodoměrná stanice je usazena před ostrohranným přelivem v přímém úseku, kde měří průměrný denní průtok, aktuální průtok, výšku vodního stavu, teplotu vzduchu a vody.

Jelikož se jedná o velkokapacitní průtokoměr, je potřeba k jeho obsluze tři osob. Po rozložení objemového průtokoměru na toku, jsou rozděleny funkce, dvě osoby obsluhují průtokoměr a jedna měří čas a zapisuje údaje o měření, přičemž v průběhu naplňování odečítá a zaznamenává hodnoty na telemetrické stanici.

Hrdlo průtokoměru je umístěno pod přeliv a musí být dbáno na to, aby bylo zachyceno celé průtočné množství. Doba měření činí zpravidla 2 – 3 minuty.

Po uplynutí doby plnění, je průtokoměr umístěn vhodně ze svahu, tak aby vytekl celý objem z vaku. Následuje změření proteklého množství, otevřením uzávěru na vodoměru. Po vyprázdnění celého objemu se odečte naměřená hodnota z vodoměru, která se převede na průtok, tedy na litry za sekundu. Měření se obvykle provádí ve třech opakováních. Aritmetickým průměrem těchto hodnot je dosaženo průměrného průtoku v $l.s^{-1}$.

5.2 Analýza odchylky v odtokovém množství

Z výše zmíněné kalibrace měrných přepadů vznikly nové rovnice konzumpčních křivek. Tyto nové rovnice byly aplikovány na naměřená data telemetrických stanic za hydrologické roky 2009, 2010, 2011. Aplikací došlo ke zpřesnění odtokového množství z jednotlivých subpovodí, které bylo porovnáno s původním kontinuálním monitoringem před kalibrací. Dále došlo k porovnání jednotlivých součinitelů odtoku a také proteklého množství za každý hydrologický rok.

Vlastní postup

Hodnoty průtočného množství naměřené telemetrickými stanicemi byly převedeny do tabulkového procesoru Microsoft Excel, kde byly roztříděny na jednotlivé hydrologické roky. Průtok byl následně přepočítán původní rovnicí měrného přepadu na výšku vodního stavu. Takto vypočítaný vodní stav byl zpřesněnou rovnicí konzumpční křivky opět přepočítán na průtok. Jednotlivé odtokové výšky za každý hydrologický rok byly vypočítány z průměrného denního průtoku. Přepočtené hodnoty byly dosazeny do vzorce pro výpočet součinitele odtoku φ dle Chmelové a kol (2012), kteří ve svém článku uvádí definici součinitele odtoku jako číselnou hodnotu, která vyjadřuje celkové podmínky pro odtok v povodí. Je to podíl výšky odtoku a výšky srážek.

Udává se jako bezrozměrná veličina nebo se může vyjádřit v %. Číslo vyjadřuje, jaké procentuální množství srážek z povodí odteklo:

$$\varphi = Ho/Hs$$

Kde: Ho je výška odtoku (mm)

Hs – výška srážek (mm)

Pokud objem odtoku přepočítáme na celou plochu povodí, tj. že vyjádříme výšku vrstvy vody, která by se vytvořila při rovnoměrném rozprostření množství

odteklé vody po ploše daného povodí, pak mluvíme o odtokové výšce H_o , která se vyjadřuje v mm a je vztažena k danému časovému intervalu.

Analogicky se určuje výška srážek H_s , která vyjadřuje výšku vrstvy vody srážek, která by se vytvořila při rovnoměrném rozprostření množství srážek spadlých na plochu daného povodí. Vyjadřuje se v mm a je vztažena k danému časovému intervalu (rok) (CHMELOVÁ A KOL., 2012).

5.3 Kvantitativní vyjádření ztrát živin z povodí

Vedle kvalitativního vyjádření jakosti vody, které je porovnatelné s vodohospodářskými normami se jeví jako nezbytné alespoň na části hospodářského katastru, odhadnout celkové množství ztrát živin. Proto při odběru vody na chemické analýzy stanovujeme také velikost průtoku (GERGEL, 1994).

Vlastní postup

Ke sledování změn jakosti vody byla použita jak diskrétní tak kontinuální metoda odběru vzorků. Kontinuální typ monitoringu zachycoval průměrný denní vzorek vody realizovaný pomocí automatických vzorkovačů ISCO 6712 formou slévaných vzorků. Vzorky odebrané automatickými vzorkovači zůstaly v zásobníku vzorkovače 1–8 dní. Ve všech odebraných vzorcích vody byl stanovován dusičnanový dusík a celkový fosfor. Rozbor všech vzorků probíhal v akreditované laboratoři VÚMOP, v.v.i., standardními metodami. Na profilech J1, J2 probíhal odběr vzorků cca v měsíčním kroku, resp. 1 krát za 4 týdny. Na profilu P52 bylo použito kontinuálního monitoringu jakosti vod, kdy byl odebírán průměrný denní vzorek.

Naměřené hodnoty mi byly poskytnuty pro stanovení velikosti odnosu živin ze tří zájmových subpovodí J1, J2 a P52. U jednotlivých profilů bylo provedeno obdobné porovnání jako u součinitele odtoku, kdy byly dosazeny do výpočtu odnosu živin hodnoty průtočného množství z původní rovnice konzumpční křivky a hodnoty po zpřesnění této rovnice.

Pro výpočet odnosu živin se využívá metodiky VÚMOP (GERGEL A KOL., 1994), kde se pro odhad množství odtransportovaných živin v kg za rok vychází z dílčích hodnot velikosti průtoků a kvality vody (obsah sledovaných látek) a zjistí se podle vztahu:

$$L_{tl} = 0,0864 \sum \Delta t_i \cdot p_i \cdot Q_i$$

Kde: L_{tl} je látkový odnos ($kg \cdot r^{-1}$)

t_i = doba trvání i – tého sledování (d^{-1})

i = i – tý interval sledování

n = počet intervalů sledování za rok

p_i = koncentrace přínosu sledované látky i – nebo sledování ($mg \cdot l^{-1}$)

Q_i = objem průtoku vody i – tého sledování ($l \cdot s^{-1}$)

V bilančních propočtech byla vyjádřena ztráta čistých živin odtokem, proto byly dusičnany přepočítány na nitrátový dusík koeficientem 0,23.

Obsah $NO_3^- \cdot 0,23$ = dusík nitrátový

Vyjádření odnosu na 1 ha plochy povodí se provede podle vztahu:

$$L_{t2} = L_{t1}/P$$

Kde: P je plocha povodí (ha^{-1})

6. VÝSLEDKY A DISKUSE

6.1 Kalibrace měrných přepadů

Jak již bylo uvedeno, měření průtoků bylo provedeno objemovou metodou celkem v sedmi termínech na profilech J1 a J2. U profilu P52 bylo provedeno měření šestkrát. Při těchto měřeních se zároveň zaznamenávaly hodnoty naměřené telemetrickou stanicí. Tyto hodnoty byly porovnány a následně byla sestrojena nová rovnice konzumpční křivky.

V tabulkách 4, 5, 6. - průtok stanovený objemovou metodou pod ostrohranným přelivem s trojúhelníkovým výřezem, byl pro porovnání označen jako Q_OBJEM, a průtok telemetrické stanice jako Q_PŘEPAD. Vypočtený rozdíl obou měření byl označen jako rozdíl Δ .

Kontrola chyb se provedla dle technické normy (TPM 6621 – 97, 1997), kde měření spočívá v porovnávání měření průtoků objemového průtokoměru, s naměřenými hodnotami telemetrické stanice.

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

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

Kde: V_c je hodnota průtoků naměřená objemovým průtokoměru

V_i - průtok zaznamenaný telemetrickou stanicí, při měření téhož objemu ve stejném čase

Tab. 4. - Experimentálně naměřené hodnoty na subpovodí P52

P52					
DATUM	ČAS	VOD_STAV h (mm)	Q_PŘEPAD (l.s ⁻¹)	Q_OBJEM (l.s ⁻¹)	ROZDÍL Δ (%)
10.1.2011	15:44	87.9	3.2	3.6	-9.3
14.1.2011	16:20	180.7	19.3	22	-12.3
30.10.2011	12:14	64.1	1.5	1.7	-13
14.11.2011	13:20	57.1	1.1	1.5	-26.7
27.2.2012	15:30	91.3	3.5	4.4	-20.1
21.2.2014	13:40	56.9	1.1	1.3	-16.2

Tab. 5. - Experimentálně naměřené hodnoty na subpovodí J1

J1					
DATUM	ČAS	VOD_STAV h (mm)	Q_PŘEPAD (l.s ⁻¹)	Q_OBJEM (l.s ⁻¹)	ROZDÍL Δ (%)
30.9.2010	11:57	79.4	2.5	2.15	16.3
10.1.2011	15:44	111.4	5.8	6.44	-9.9
13.1.2011	14:06	205.6	26.6	35.52	-25.1
17.3.2011	14:48	157.5	13.7	15.88	-13.7
8.7.2013	12:30	76.8	2.3	2.8	-17.9
19.11.2013	9:45	57.1	1.1	1.3	-15.4
20.2.2014	10:15	59.1	1.2	1.1	9.1

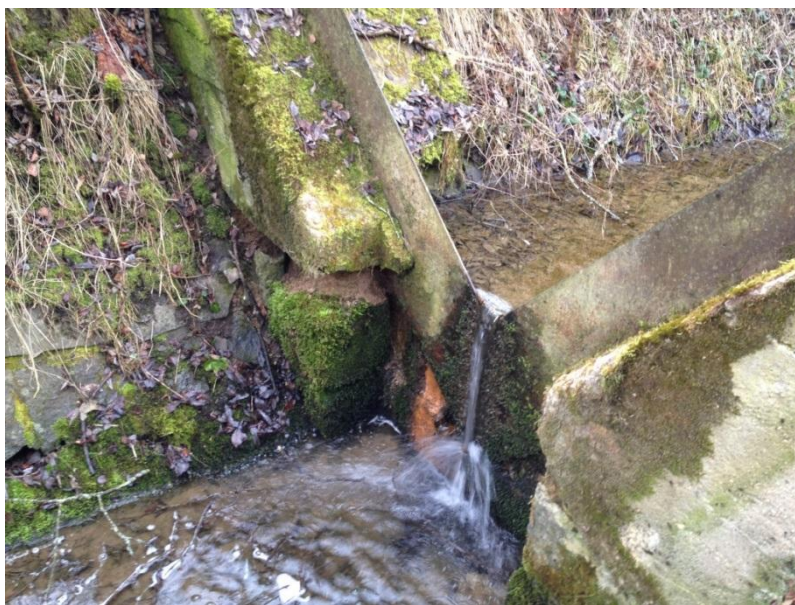
Tab. 6. - Experimentálně naměřené hodnoty na subpovodí J2

J2					
DATUM	ČAS	VOD_STAV h (mm ⁻¹)	Q_PŘEPAD (l.s ⁻¹)	Q_OBJEM (l.s ⁻¹)	ROZDÍL Δ (%)
30.9.2010	10:45	68.0	1.7	1.99	-14.6
10.1.2011	16:45	99.2	4.35	4.95	-12.1
13.1.2011	16:09	202.5	25.6	29.42	-13.0
17.3.2011	15:55	168.0	16.1	17.82	-9.7
8.7.2013	11:20	87.81	3.21	2.93	9.6
19.11.2013	13:06	55.14	1.01	1.18	-14.4
20.2.2014	10:50	52.64	0.9	0.97	-7.2

Jak je patrné z tabulky 4. - největší rozdíl hodnot mezi objemovým měřidlem a telemetrickou stanicí u subpovodí P52 byl za nejnižších hodnot vodního stavu. Jak dokazuje technická příručka pro ultrazvukové průtokoměry ELA (2009), pro měrný přepad je nutno volit takovou velikost, aby byl dobře využit jeho rozsah. Je nepřijatelné, pohybuje-li se hodnota reálného průtoku pouze v dolní polovině měřicího rozsahu daného přelivu (viz obr. 11).

Dalšími problematickým jevem je u subpovodí J1 krátká nátoková vzdálenost, kde nedochází k přechodu turbulentního toku na latentní. To potvrzuje ve své práci i Povýšilová (2012). Zároveň je měrný profil limitován velikostí. Každý měrný profil je navržen na určité hodnoty průtoku. To znamená, že je dán minimální a maximální měřitelný průtok. Jakmile jsou hodnoty překročeny nebo podkročeny získané údaje jsou mimo rozsah. Tyto vlastnosti měrného profilu jsou pro jeho použití limitující.

U měrného Thomsonova přepadu je z hlediska přesnosti měření žádoucí využívat především přepady s malým vrcholovým úhlem, aby měřená hladina byla co nejvyšší. Při průtoku na horní mezi pracovního intervalu daného měrného místa musí být výška hladiny alespoň 30 cm, jinak se výrazně snižuje přesnost měření (ELA, 2009).



Obr. 11. – Thomsonův přepad, Foto: Autor

Na profilech J1 a J2 (tabulky 5, 6.) - je patrné, že největší nejistoty byly stanoveny v lednu a březnu roku 2011. Nejistoty v těchto termínech byly způsobeny převážně velkým průtokem, který přesáhl maximální limit měrného přepadu. Průtočné množství v tomto období bylo navýšeno odtávající sněhovou pokrývkou.

Podle Zeleného (1976) je spolehlivost měřícího přístroje, schopnost udávat za stanovených podmínek měřenou hodnotu v mezích požadované přesnosti. Poněvadž spolehlivost se stanovuje z velkého počtu měření statistickými metodami, připouští se vznik i větších chyb, než je hodnota mezní chyby.

Možné chyby při automatickém měření průtoku

V technických podmínkách ultrazvukových průtokoměrů ELA (2009) je popsáno, že kvalita měření může být ovlivněna velmi silnou vrstvou pěny na hladině. Pěna na povrchu toku může způsobit vykazování vyšších hodnot, jelikož se ultrazvukový signál odrazí od pěny a ne od hladiny vody. V případě kontinuálního monitoringu na profilech J1 a J2 je také jednou z dílčích nejistot při měření led. Při určité výšce vodního stavu se v mrznoucím období vytvoří ledová krusta, která setrvává v určité výšce. Tuto výšku dále zaznamenává telemetrická stanice jako vodní

hladinu. Krusta je při nižším průtoku zachycena v určité výšce díky příčnému sklonu koryta a dále nekopíruje změnu vodního stavu.

Dalším významným důvodem nejistot v kontinuálním monitoringu jsou na jednotlivých měrných profilech stromy a keře v okolí měrného přepadu. Dřeviny jsou producentem spadlého listí a větví. I mála větev, která se zachytí v ostrohranném přelivu (viz obr. 12.), má za následek zvýšení vodního stavu před přepadem o několik milimetrů. V kombinaci se spadlým listím je toto zvýšení i v řádech centimetrů.



Obr. 12. – Zachycená větev v ostrohranném přepadu, Foto: Autor

Na subpovodí J1 dochází v blízkosti měrného přepadu k erozi půdy, ta je povrchovým odtokem transportována k měrnému přepadu kde část protéká v podobě plavenin (viz kapitola nejistoty měření). Zbylá část naerodovaného materiálu se akumuluje před ostrohranným přepadem. Přestože se při každém bodovém měření odstraňuje sediment z nátokové části před přepadem, akumulace naerodovaných částic je na tomto přepadu značná a v intervale několika měsíců je nátoková část opět zanesena. Sediment se stále rozrůstá, až zasahuje pod měrné čidlo a je zaznamenáván jako vodní hladina (viz obr. 13.)



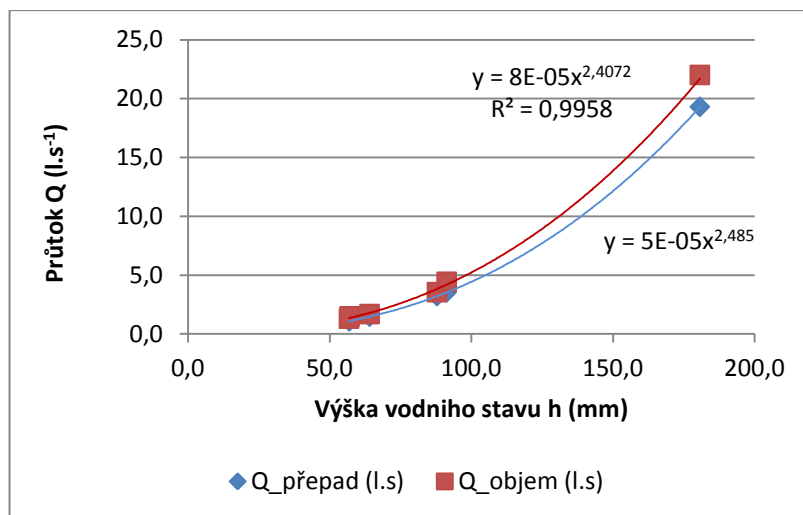
Obr. 13. – Sediment pod měrným čídem, Foto: Autor

Q-h křivka profilu

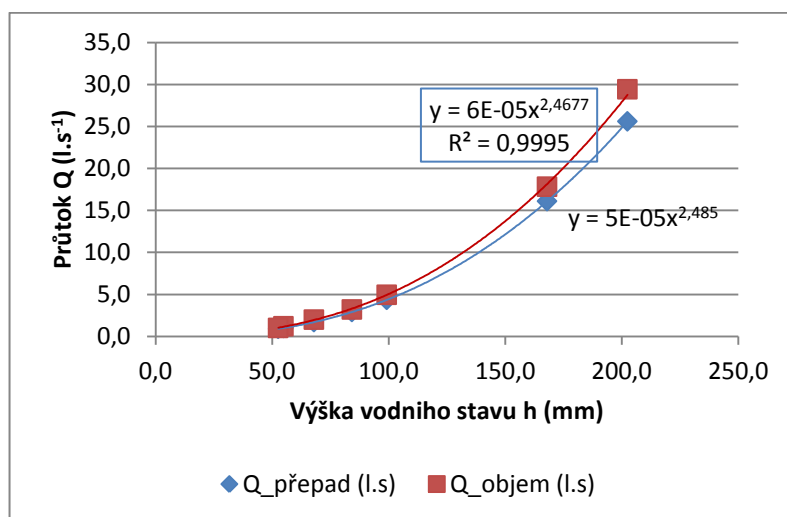
Dle odborného článku Pars aqua (2009) u profilů, kde dochází ke změně z říčního proudění na bystřinné, se stanoví konzumpční křivka hydrometrováním jako závislost průtoku na vodním stavu. Místo pro stanovení Q-h křivky se volí min. 3 h_{max} . před místem, kde vzniká kritická hloubka.

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

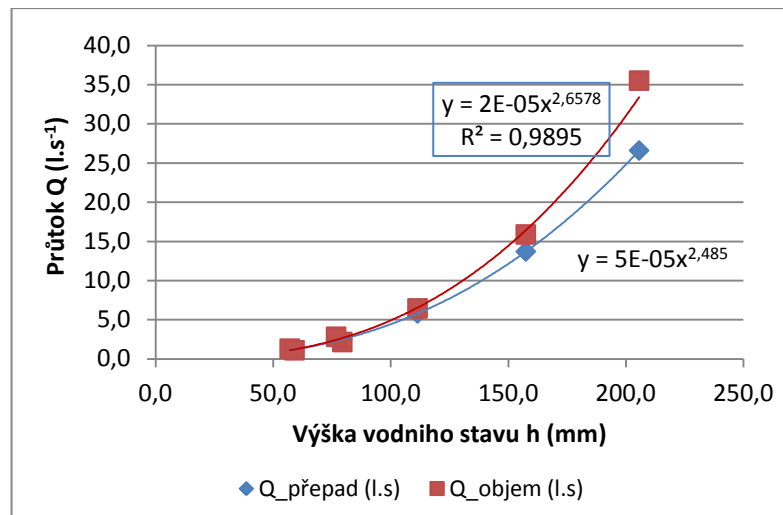
Přepočtené hodnoty průtočného množství a přepadové výšky zaznamenané v tabulkách 4, 5, 6. byly vyneseny do grafů 1,2,3., kde je znázorněna závislost průtoku na výšce hladiny konzumpčními křivkami.



Graf 1. – Stanovení nové rovnice konzumpční křivky pro profil P52



Graf 2. – Stanovení nové rovnice konzumpční křivky pro profil J2



Graf 3. – Stanovení nové rovnice konzumpční křivky pro profil J1

Na základě objemového měření byly stanoveny nové rovnice konzumpčních křivek pro profily P52, J1 a J2, které mají tvar mocniných regresních rovnic.

$$P52: y = 0,00008x^{2,4702}$$

$$J2: y = 0,00006x^{2,4677}$$

$$J1: y = 0,00002x^{2,6578}$$

Kde: x je výška vodního stavu (mm)

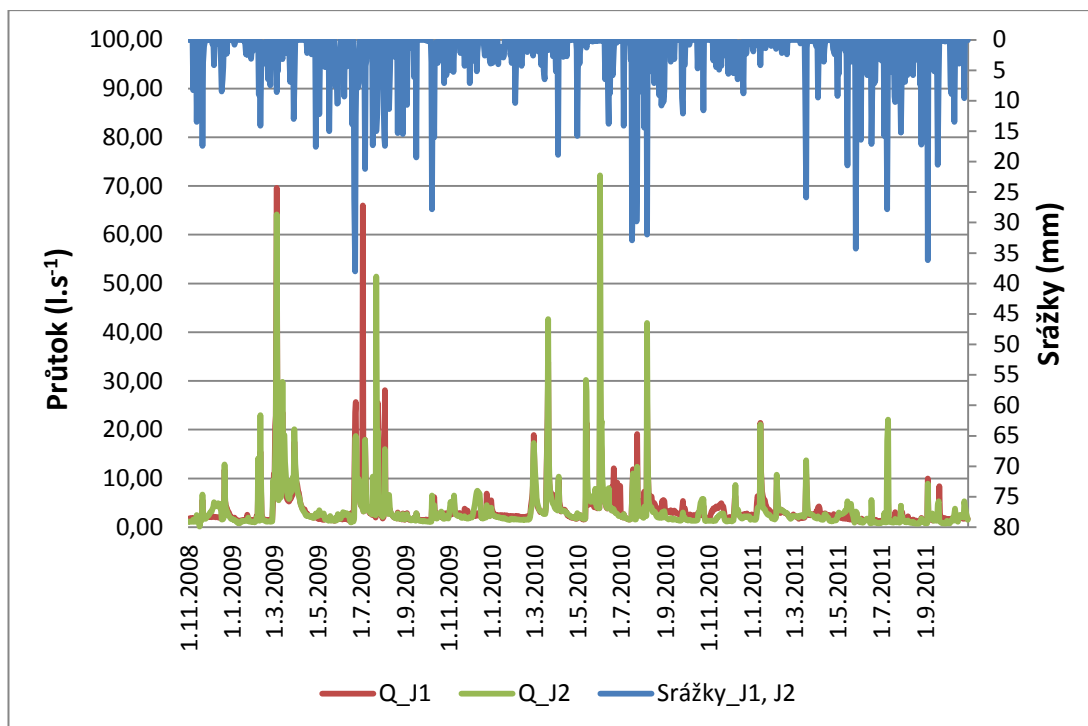
y – průtočné množství ($l.s^{-1}$)

Z důvodu vysoké věrohodnosti kontrolních měření (dlouhá doba napouštění objemového průtokoměru), bude rovnic dále využíváno pro hydrologický výzkum na daných povodích.

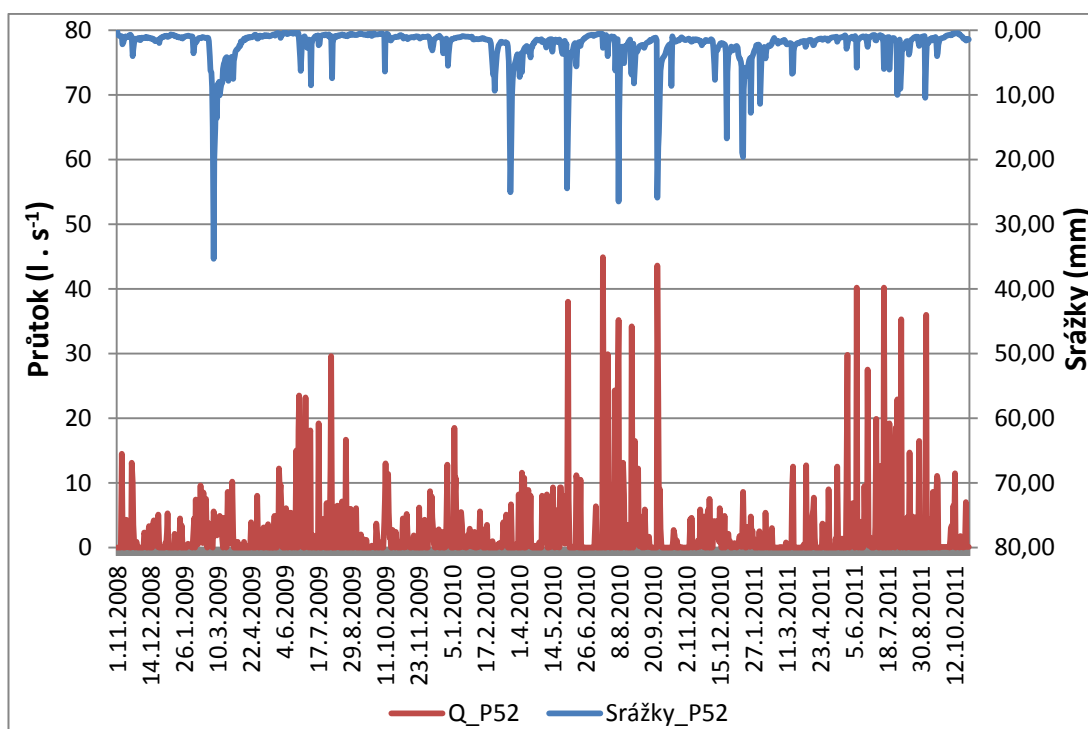
6.2 Analýza odchylky v odtokovém množství

V další fázi výsledků bylo provedeno porovnání odchylky v součiniteli odtoku pro jednotlivá subpovodí. Validace součinitelů odtoků byla provedena pro názorné objasnění, jaký vliv může mít nejistota v měření průtoků na jeho konečné stanovení.

Z výše uvedené metodiky je pro výpočet součinitele odtoku, nutnost zanesení výšky srážek. Do tohoto výpočtu byly zaneseny data ze srážkoměrných stanic umístěných na povodí Jenínského a Kopaninského toku. V grafech 4, 5. jsou znázorněny srážko-odtokové situace pro jednotlivá subpovodí.



Graf 4. – Srážko-odtoková situace, subpovodí J1, J2 pro roky 2009, 2010, 2011



Graf 5. – Srážko-odtoková situace, subpovodí P52 pro roky 2009, 2010, 2011

Na základě hodnot srážek pro jednotlivá povodí bylo provedeno posouzení charakteru aktuálních hodnot srážkových úhrnů podle Rožnovského (1999), který ve své publikaci uvádí tabulku 7. pro posouzení normálnosti srážkových poměrů.

Tab. 7. – Stupnice charakteru aktuálních hodnot srážkových úhrnů pro ČR

Charakter měsíce (roku, ročního období)	Procenta normálu	
	Měsíc	Rok a roční období
Normální	75 - 125	90 – 110
Vlhký	126 - 150	110 – 120
velmi vlhký	151 - 200	121 – 140
mimořádně vlhký	nad 200	nad 140
Suchý	50 - 74	80 – 89
velmi suchý	25 - 49	60 – 79
mimořádně suchý	pod 25	pod 60

Hodnoty pro porovnání srážkových úhrnů, které jsou v tabulkách 8, 9. označeny jako Normál (mm) byly odečteny z portálu ČHMI (2014). Jsou to hodnoty dlouhodobého normálu, které jsou sledovány pro jednotlivé kraje ČR od roku 1961.

Tab. 8 - Charakter srážkových úhrnů na povodí Jenínského potoka

Rok	Srážky (mm)	Normál (mm)	% normálu	Charakter roku
2009	828.7	644	129	Velmi vlhký
2010	622	644	97	Normální
2011	671.7	644	104	Vlhký

Tab. 9 – Charakter srážkových úhrnů na povodí Kopaninského potoka

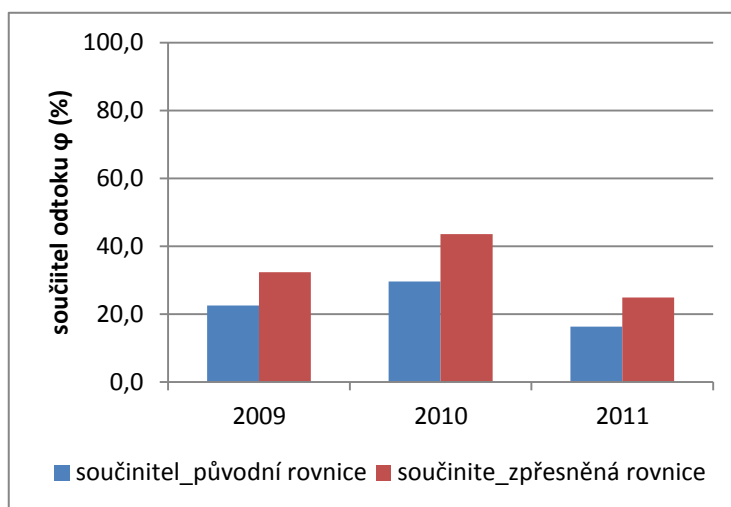
Rok	Srážky (mm)	Normál (mm)	% normálu	Charakter roku
2009	725.7	659	110	Vlhký
2010	866.3	659	131	Velmi vlhký
2011	761.9	659	116	Vlhký

Jak uvádí ČHMI (2010) ve svém odborném článku, stanovení odtokové výšky jako průměrné hodnoty na povodí je jednoznačná záležitost, výpočet je poměrně jednoduchý a přesnost výsledné hodnoty závisí spíše na přesnosti vyhodnocení průtoků než na samotné metodě stanovení odtokové výšky.

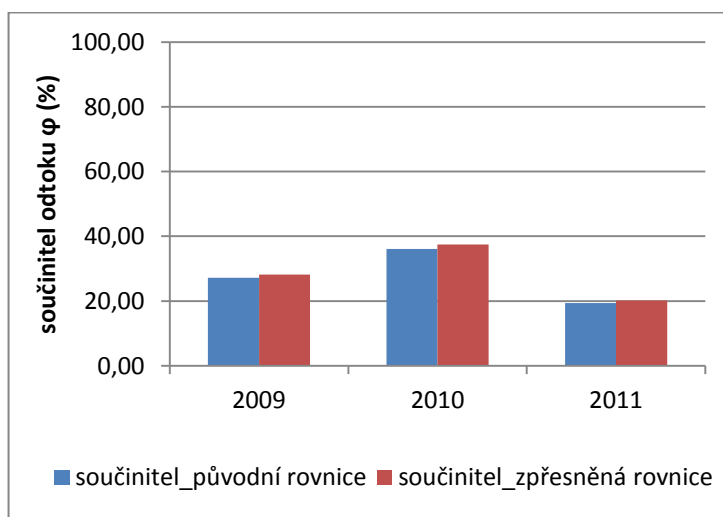
Faktorem v rozdílnosti stanovení součinitele u jednotlivých subpovodí je využití území, půdní druh, skeletovitost a v neposlední řadě také jeho svažítost, které jsou u jednotlivých povodí popsány v materiálech této diplomové práce. Podle Skleničky (2003), změna využívání krajiny ovlivňuje retenci a vsakovací schopnost. Ve výsledku dochází ke změnám charakteristik povrchového odtoku,

v negativním slova smyslu dochází ke zvýšení povodňových průtoků a ke snížení průtoků v suchých obdobích.

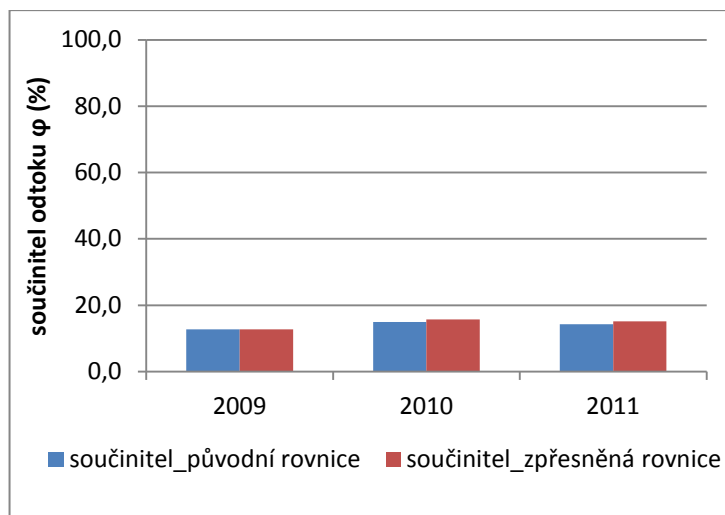
V grafech 6, 7, 8. je možné zřetelně vidět odchylku, která je dána aplikací rozdílných odtokových výšek z přepočtu rovnice pro měrný případ. Je patrné, že největší rozdíl je u subpovodí J1 (viz graf 6), kde byl kontinuální monitoring značně ovlivněn nahodilými chybami. Tyto chyby popisují ve své knize Pelikán a kol. (1988), nahodilé chyby jsou typické tím, že jejich hodnota i znaménko se při velkém počtu měření téže hodnoty dané veličiny za prakticky stejných podmínek mění nepředvídaným způsobem.



Graf 6. – Součinitel odtoku, subpovodí J1: 46,8 ha



Graf 7. - Součinitel odtoku, subpovodí J2: 55,2 ha



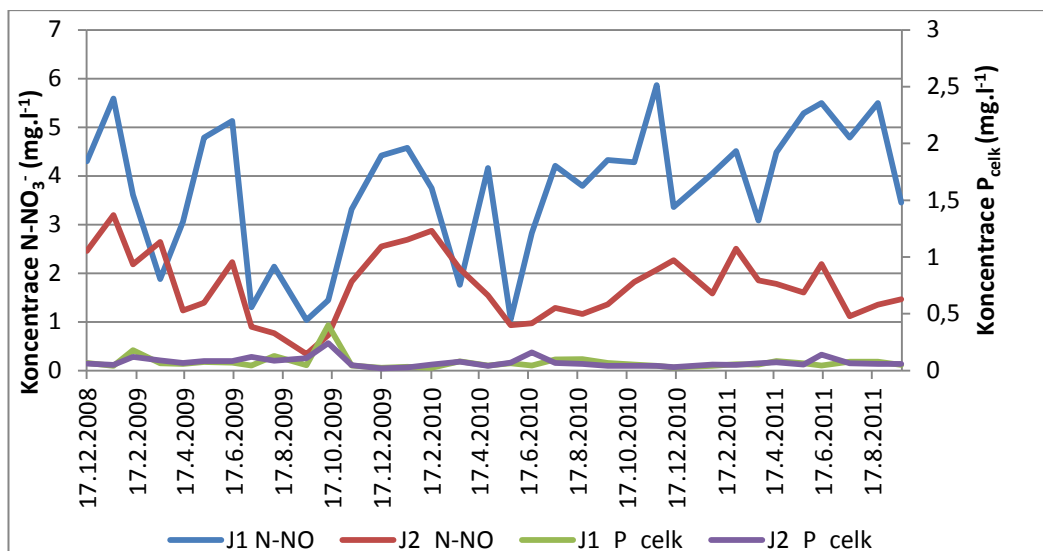
Graf 8. – Součinitel odtoku, subpovodí P52: 64,9 ha

Z výše uvedených grafů 6, 7, 8. je zřejmé, že nejmenší součinitel odtoku φ byl u subpovodí P52, kde se hodnoty pohybovaly kolem 15 %. Hodnota je podle Skleničky (2003) dána převážně využíváním krajiny, která ovlivňuje retenci a vsakovací schopnost. U subpovodí P52 je tomu hlavně z důvodu velkého zastoupení lesa, který zaujímá 64 % povodí.

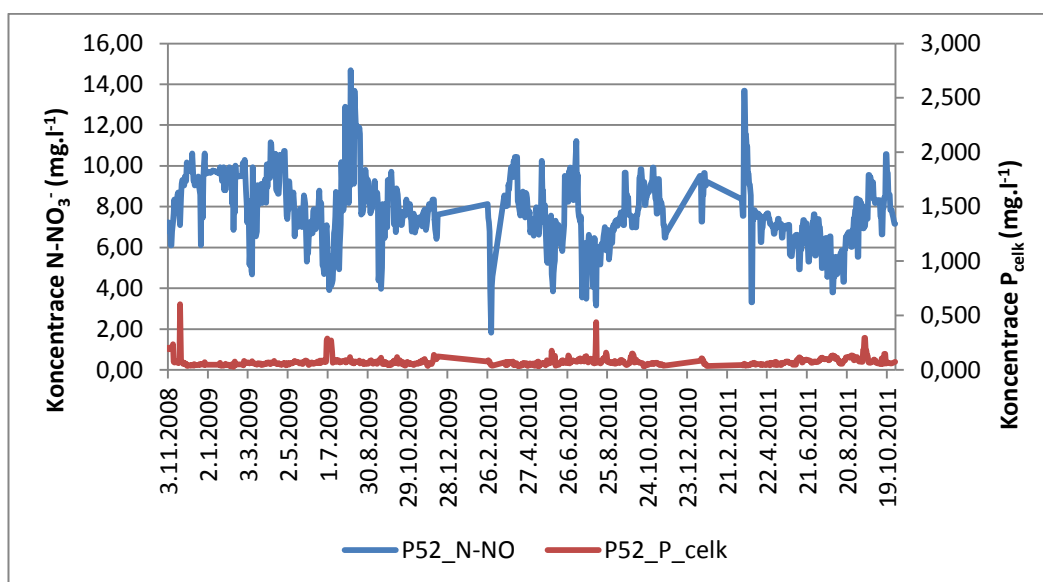
Lesní porosty díky i) zvýšené intercepci (ovlivněná hustotou porostu a zvýšenou drsností povrchu); ii) zvýšené transpiraci (velké množství biomasy, hluboké kořenové systémy a celoroční funkce); iii) zvýšené rozrušení půdní struktury, vyšší retenční a infiltrační schopnosti snižují jak přímý, tak základní odtok (SMAKHTIN, 2001)

6.3 Kvantitativní vyjádření ztrát živin z povodí

V této fázi výsledků bylo do diplomové práce zaneseno i kvantitativní vyjádření ztrát živin. Vyhodnocení proběhlo na základě závislostí jednotlivých koncentrací a hodnot na celkovém odtoku a jeho průběhu během hydrologických let 2009, 2010, 2011. U tohoto vyhodnocení bylo provedeno také porovnání změn za použití průtočného množství před a po kalibraci měrných přepadů. Dále se zjišťovalo hmotnostní množství odnesených látek. Pro subpovodí J1 a J2 byly zpracovány měsíční odběry vzorků, které jsou zobrazeny v grafu 9. U subpovodí P52 graf 10. jsou hodnoty uvedené v denním chodu.



Graf 9 - Hodnoty koncentrací dusičnanového dusíku a celkového fosforu v měsíčním intervalu.



Graf 10 – Hodnoty koncentrací dusičnanového dusíku a celkového fosforu v denním intervalu

Jak je patrné z grafu 10. na subpodvodi P52 v termínech od 13.12.2009 do 26.2.2010 a od 22.1.2011 do 14.3.2011 bylo vzorkovací zařízení mimo provoz, tato skutečnost je dána bezpečnostním vyřazením vzorkovače, aby nedošlo při teplotách dosahujících bodu mrazu k poškození.

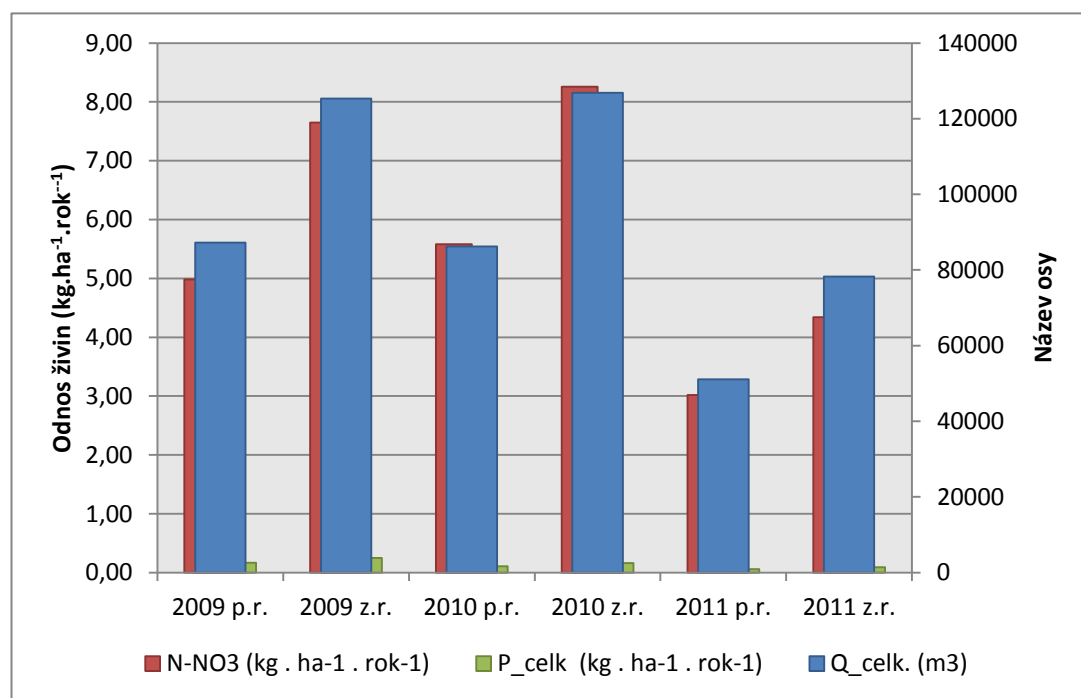
Pro výpočet ztrát živin v těchto chybějících termínech byly použity průměrné hodnoty koncentrací, totožně jako při stanovování odnosu v měsíčním intervalu.

Do tabulek 10, 11. byly zaneseny hodnoty celkového odtoku pro jednotlivé hydrologické roky. Pro každý rok je také stanovený celkový odtok, vypočítaný

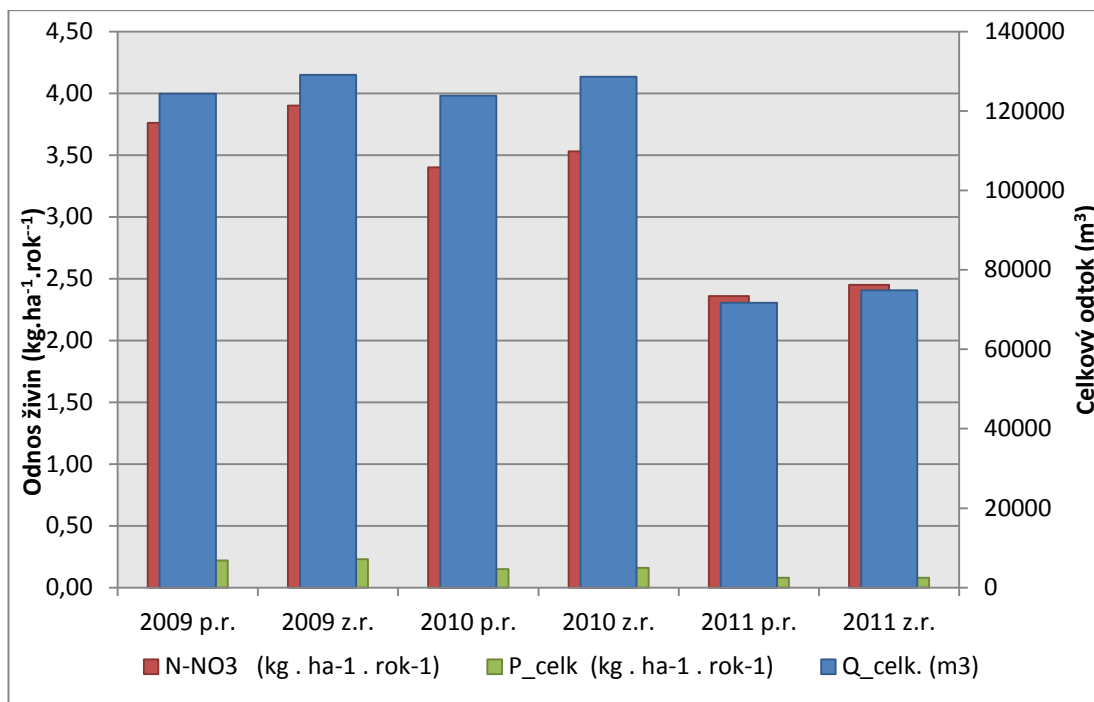
původní a zpřesněnou rovnicí (p.r., z.r.). Výsledky výpočtu specifického odnosu živin z jednotlivých povodí jsou vyjádřeny v $kg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$.

Tab. 10 – odnos živin na subpovodí J1, J2

Odnos živin v měsíčním intervalu							
Profil	Proměnná	2009 p.r.	2009 z.r.	2010 p.r.	2010 z.r.	2011 p.r.	2011 z.r.
J1	Q_celk. (m ³)	87214	125360	86215	126870	51101	78278
	N-NO ₃ ⁻ (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	4.98	7.65	5.58	8.26	3.02	4.34
	P_celk (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	0.17	0.25	0.11	0.16	0.06	0.09
J2	Q_celk. (m ³)	124369	129056	123837	128578	71703	74829
	N-NO ₃ ⁻ (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	3.76	3.90	3.40	3.53	2.36	2.45
	P_celk (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	0.22	0.23	0.15	0.16	0.08	0.08



Graf 10 - Specifický odnos živin J1

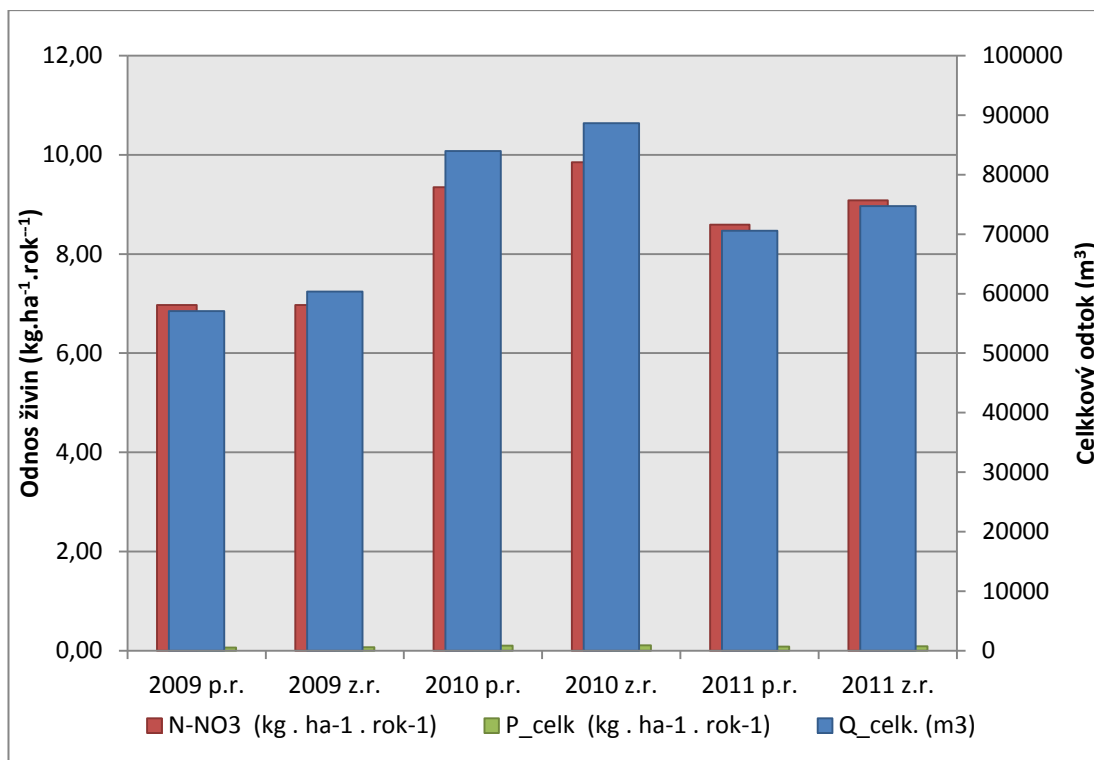


Graf 11 – Specifický odnos živin J2

Jak dokládá odborný článek Kvitka a kol. (2012) denní chod odnosu i sezónní průběh odnosu dusičnanového dusíku a fosforu (grafy 10,11, 12.) dokumentuje zjištěné výsledky, že stěžejním parametrem odnosu je odtok. Z těchto grafů můžeme také pozorovat změnu množství specifického odnosu za původní a zpřesněné rovnice.

Tab. 11 – Odnos živin na subpovodí P52

Odnos živin v denním intervalu							
Profil	Proměnná	2009 p.r.	2009 z.r.	2010 p.r.	2010 z.r.	2011 p.r.	2011 z.r.
P52	Q_celk. (m ³)	57046	60347	83996	88659	70563	74693
	N-NO ₃ ⁻ (kg·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹)	6.97	6.97	9.35	9.85	8.59	9.08
	P_celk (kg·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹)	0.06	0.07	0.10	0.11	0.08	0.09



Graf 12 – Specifický odnos živin P52

Z grafů 10, 11, 12. můžeme vypočítat změnu ve ztrátě živin za původní a zpřesněné rovnice. Na subpovodí J1 nejistota v měření průtoků způsobila rozdíl ve specifickém odnosu až 30%. V případě J1 a P52 se pohyboval rozdíl ve ztrátě živin v rozmezí od 2 do 5%.

K odnosu dusíku z povodí se vyjadřuje McDonnell (2007), který tvrdí, že odnosy korespondují s celkovým odtokem. Doležal a kol. (2006) zmiňuje ve své knize, že vysoká míra odnosu dusičnanů se objevuje v předjaří a v obdobích s vysokým průtokem. Pionke a kol. (1997) uvádí, že za vyplavení většího množství živin je zodpovědná obvykle jen jedna nebo dvě větší srážko-odtokové události v roce.

Na základě výpočtů specifických odnosů živin z povodí bylo provedeno vyhodnocení podle Gergela (1994), ten uvádí ve své metodice tabulku 12. s rámcovými dávkami pro posouzení odnosu látek.

Tab. 12 – Dusík (kg . ha⁻¹ . rok⁻¹)

0 – 10	ztráty zanedbatelné
10 – 20	ztráty přiměřené
20 – 30	ztráty zvýšené, vyžadující zpřesnění kontroly systému hospodaření
nad 40	ztráty nepřiměřené, vyžadující bezodkladný zásah

Z tabulky 12. je patrné, že všechna zájmová subpovodí spadají do první kategorie (ztráty zanedbatelné), jelikož u žádného subpovodí nepřekračuje ztráta dusíku $10 \text{ kg. ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Takto malé ztráty jsou zapříčiněny hlavně způsobem využití jednotlivých povodí. Na supovodích J1 a J2 jsou krajinnými maticemi trvalé travní porosty. Podobně se k této skutečnosti vyjadřují Kvítek a kol. (2007), kteří uvádí, že zapojený travní porost může využívat dešťové srážky asi z 67%. Důležitá je hustota kořenového systému ve svrchní vrstvě půdy cca do 50 cm, kde se nachází největší část kořenů. Tuto vrstvu lze považovat za dějiště různých interferencí mezi druhy, místo, kde dochází k nejintenzivnější činnosti mikroorganismů, k výměně plynů mezi půdou a atmosférou a v neposlední řadě také k rozhodující sorpci živin a vody. U subovodí P52 je krajinnou maticí lesní porost. Vesterdal a kol. (1995) ve své knize uvádí, že rozklad podestýlky důležitým článkem v biogeochemickém koloběhu živin v lesních ekosystémech, protože organicky vázané živiny jsou mineralizovány a opět poskytnuty vegetaci.

7. ZÁVĚR

Cílem práce bylo především provedení kalibrace průtoku na měrných přepadech. Dílčím cílem bylo vybrat vhodné měrné přepady, které jsou osazeny zařízeními pro kontinuální měření průtoků a na nich provést kontrolní měření přesnější metodou. Vedoucím práce byly vybrány profily, na kterých bylo potřeba zkalibrovat rovnici konzumpční křivky. Bodovým měřením bylo prokázáno, že vlivem rozdílných podmínek nad přepadem dochází u kontinuálního monitoringu k nejistotám měření, proto se musí ke každému měření průtoku přistupovat individuálně a zvážit situaci na konkrétním místě instalace. Na základě kalibrování průtoku byl proveden výpočet součinitelů odtoku pro jednotlivá subpovodí před a po kalibraci průtoků. Hodnoty srážek, které vstupovaly do těchto výpočtů, sloužily i jako podklad pro stanovení charakteru jednotlivých hydrologických let.

V návaznosti s měřením průtoků byl na zájmových lokalitách stanoven kvantitativní odnos živin, do tohoto výpočtu byl dosazen celkový odtok za původní a zpřesněné rovnice. Pro vyhodnocení ztrát živin bylo využito denních a měsíčních hodnot v období hydrologických let 2009 až 2011. U žádného ze subpovodí nedosáhla hodnota specifického odnosu dusíku $10 \text{ kg. ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Výsledky prokázaly, že významným faktorem ovlivňující odnos látek z povodí je odtok vody, proto by mělo být dbáno na zvyšování retenční a akumulární schopnosti krajiny, které umožňují využití větší části srážek pro vegetaci, resp. pro transformaci srážek zpět na výpar a tím snížení jejich odtoku z povodí.

Významným výsledkem této diplomové práce je zpřesnění datových vstupů jak pro modelování srážko-odtokových procesů, tak i pro ostatní hydrologické analýzy a studie v rámci výzkumných projektů na katedře krajinného managementu.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1991, 261-304 s.
2. Bezdíček, V.: *Hydrologie*. EVUT Brno, Brno 1966, 251 s.
3. Boiten, W.: *Hydrometry*. IHE Delft Lecture Note, Balkema, Rotterdam 2000, 246 s.
4. Bruthans J.: Využití přirozených stopovačů (18O; 3H; freony; SF6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR, MS PřF UK, Praha, 207 s.
5. Bumerl, M.: *Hydrologie*. SOŠ OTŽP Veselí nad Lužnicí, Veselí nad Lužnicí 2003, 56 s. [online], [cit. 2014-02-11]. Dostupné na WWW: <http://www.sos-veseli.cz/download/hydrologie_ucebni%20_text.pdf>
6. Český hydrometeorologický ústav.: *Hydrologické vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. 2. etapa, Bilanční posouzení srážek a odtoku*, Praha 2010, 60 s. [online], [cit. 2014-02-18]. Dostupné na WWW: <http://voda.chmi.cz/pov02/2etapa/hlavni_zprava/kap3.pdf>
7. Český hydrometeorologický ústav.: *Územní srážky 2009-2011*. [online], [cit. 2014-02-16]. Dostupné na WWW: <http://www.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&last=false>
8. ČSN 75 0101.: *Vodní hospodářství - Názvosloví hydrologie*. Česká technická norma, Český normalizační institut, Praha 2003, 23 s.
9. ČSN ISO 3455.: *Měření průtoků kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích*, Praha 1993, 42 s.
10. Demek, J.: *Úvod do krajinné ekologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc 1999. 102 s.
11. Doležal, F., Kulhavý, Z., Kvítek, T., Soukup, M., Tippl, M.: *Methods of runoff separation applied to small stream and tile drainage runoff*. In: Holko, L., Miklánek, P.: (Eds.) *Interdisciplinary approaches in small catchment hydrology: Monitoring and research*. IHP-VI Technical Documents in Hydrology no. 67, UNESCO, Paris 2003, s. 131-136.
12. Dub, O.: *Hydrologie*. SNTL Praha, Praha 1969, 380 s

13. Durst, R., Melling, A., Whitelaw, J. H.: Principles and practise of laser Doppler anemometry. New York Academics Press, New York 1981, 58 s. ISBN 0- 12-225260-8.
14. Ela spol, s.r.o.: Ultrazvukový průtokoměr MQU 99. Uživatelská příručka, Ela spol s.r.o., Brno 2009, 34 s.
15. Fiedler-Mágr.: Dokumentace k přístroji M4016. České Budějovice 2014, 4 s. [online], [cit. 2014-12-18]. Dostupné na WWW: <<http://www.fiedler-magr.cz/sites/default/files/dokumenty/datasheet-m4016.pdf>>
16. Gergel, J.: Hlavní zásady pro odběr a vyhodnocování kvality povrchových vod odtékajících ze zemědělsky využívaných povodí. VÚMOP Praha, Praha 1994, 25 s.
17. Chamrad, V., Kříž, V., Litschmann, T.: Přesnost měření průtoku hydrometrickou vrtulí se zřetelem k technice měření a vyhodnocení výsledků. Sborník prací svazek 27, Praha 1982, 121 s.
18. Chmelová, R., Frajer, J.: Základy hydrologie. Univerzita Palackého, Olomouc 2012, 81 s. [online], [cit. 2014-02-16]. Dostupné na WWW: <<http://geography.upol.cz/soubory/studium/DS-GVS/Opora-DHYDR.pdf>>
19. ISO 9555-1: Measurement of liquid flow in open channels – Tracer dilution methods for the measurement of steady flow – Part 1: General, Geneva 1994, 44 s.
20. Jenčík, J.: Ultrazvukové průtokoměry. Automatizace, Ročník 41, číslo 5, Praha 1998, s. 300 – 303.
21. Jeníček, M.: Hydrometrie - měření hydrologických veličin. Praha 2011, 14 s. [online], [cit. 2014-01-10]. Dostupné na WWW: <<http://is.cuni.cz/studium/predmety/index.php?do=download&did=40949&kod=MZ330P61Z>>
22. Kadlec, K.: Snímače průtoků – principy, vlastnosti a použití. Odborný časopis Automa – snímače a převodníky, Praha 2006, 29 s.
23. Kemel, M.: Hydrologie. EVUT Brno, Praha 1994. 76 s.
24. Kněžek, M., Kessler, J.: Podzemná voda. Metody výpočtu základního odtoku, 4/2010, č. 2, 52 s.
25. Krešl, J.: Hydrologie. Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno 2001, 128 s.

26. Kříž, V., Kupčo, M., Sochorec, R.: Hydrometeorologický ústav Praha. SNTL Praha, Praha 1979, 148 s
27. Kunstátský, J., Patočka, C.: Základy hydrauliky a hydrologie. SNTL Praha, Praha 1966, 250 s.
28. Kvítek, T., Bůzek, F., Kadlecová, R., Mrkvička, J., Svobodová, M., Šantrůček, J., Bystřický, V., Gergel, J., Lechner, P., Ondr, P., Váchal, J., Žlábek, P., Duffková, R., Fučík, P., Kaplická, M., Kvítek, T., Lexa, M., Peterková, J., Novák, P., Zajíček, A.: Zatravňování orné půdy s vysokým rizikem infiltrace – opatření pro cílené snižování dusičnanů ve vodách. VÚMOP, v.v.i., Praha 2007, 110 s., ISBN 978-80-254-0972-5
29. Kvítek, T., Bystřický, V., Peterková, J., Žlábek, P., Moravcová, J.: Dynamika koncentrací a interakce odnosu dusičnanů a fosforu na malých zemědělsko-lesních subpovodích v povodí VN Švihov na Želivce. Vodní hospodářství, 6. Vydání, Praha 2012, s. 198 – 202. [online], [cit. 2013-12-23]. Dostupné na WWW: <<http://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2012/vh06-2012.pdf>>
30. Laenen, A.: Smith, W.: Acoustic Systems for the measurement of streamflow. Geological Survey Water-Supply. U.S. 1983, 124 s.
31. Mašát, K., Němeček, J., Tomiška, Z.: Metodika vymezení a mapování bonitovaných půdně ekologických jednotek. VÚMOP Praha, Praha 2002, 113 s.
32. Matoušek, V.: Poznávání odtokových vlastností malých povodí za regionálních dešťů. VÚV T.G.M., v.v.i., Praha 2010, 110 s. ISBN 978-80-87402-08-5.
33. Mattas, D.: Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách. Výzkum pro praxi, VÚV T.G.M., Praha 1998, 37 s.
34. McDowell, R.W.; Sharpley, A.N. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. Science of the Total Environment, 278., 2001, s. 113-125. In: Bystřický, P.: Analýza časových řad nutrientů v celkovém i základním odtoku ve vybraném povodí. Disertační práce, ZF JČU České Budějovice 2012, 138 s.
35. Moravcová, J.: Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ. Disertační práce, ZF JČU České Budějovice 2011, 146 s.

36. Novotná, J.: Vliv dynamiky podpovrchového odtoku na základové poměry. GEOtest a.s., Brno 2012, s. 2 [online], [cit. 2014-01-20]. Dostupné na WWW:<http://www.geotest.cz/underwood/download/files/zs_2012_novotna.pdf>
37. PARS Aqua s.r.o.: Odborný článek o měření průtoků, článek č.12, Praha 2009, 40 s. [online], [cit. 2014-03-21]. Dostupné na WWW: <<http://www.pars-aqua.cz/clanek12.html>>
38. Pelikán, V., Běluša, L., Doležal, V., Hickl, J., Klein, F., Loupanec, M.: Hydrogeologická měření. SNTL Praha, Praha 1988, 219 s
39. Pionke, H.B., Gburek, W.J., Sharpley, A.N., Zollweg, J.A.: Hydrological and chemical controls on a phosphorus loss from catchments. 1997, In: Bystřický, P.: Analýza časových řad nutrientů v celkovém i základním odtoku ve vybraném povodí. Disertační práce, ZF JČU České Budějovice 2012, 138 s.
40. Povýšilová, M.: Měření průtoků na ČOV – řešení problematických jevů. Technoaqua s. r. o., Praha 2012, 12 s [online], [cit. 2014-03-27]. Dostupné na WWW: <<http://www.technoaqua.cz/underwood/download/files/prednaska-povysilova-mereni-prutoku-na-cov-reseni-problematickych-jevu.pdf>>
41. Preisler, B., Kroupa, Z., Mykišková, M.: Měření množství a průtoků v automatizaci. SNTL Praha, Praha 1967, 164 s.
42. Quantum Hydrometrie GmbH.: Bau und Betrieb von Ultraschall – Durchflussmessanlagen. Berlin 2001, 27 s. [online], [cit. 2014-04-12]. Dostupné na WWW: <<http://www.quantum-hydrometrie.de>>
43. Quitt, E.: Klimatické oblasti ČSSR. Studia geographica, Brno 1971.
44. Riyaz J., Steffen L.: Methods of Flow Measurement for Water and wastewater. Zpracováno pro NIVUS Inc. 3rd edition, 2002, 47 s.
45. Rožnovský, J.: Klimatologie. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno 1999, 146 s.
46. Schröder, W., Euler, G., Schneider, K., Knauf, D.: Grundlagen des Wasserbaus. 3. Auflage, Werner Verlag 1994, 52s.
47. Sklenička, P.: Základy krajinného plánování. Naděžda Skleničková, Praha 2003, 321 s.
48. Smakhtin, V.U.: Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 2001. s. 147-186.

49. Soukup, M., Hrádek, F.: Optimální regulace povrchového odtoku z povodí. Ústav meliorací a ochrany půdy, Praha 1999. 98. s.
50. Strnad, R.: Trendy měření průtoku. GAS s.r.o., Praha 2004, 35 s.
51. Svoboda, J.: Regionální geologie ČSSR. Československa akademie věd, Praha 1964, 380 s.
52. Šilar, J.: Hydrologie v životním prostředí. Svazek 16, Vysoká škola báňská. Ostrava, Ostrava 1996, 41 s.
53. Technický předpis metrologický TPM 6621 – 97.: Měření průtoku vody v uzavřených potrubích - měřidla pro studenou pitnou vodu, metody zkoušení. Praha 1997, 45 s.
54. Van Leer, B.R.: Pipe Method of Water Measurement. Eng. News-Rec., California 1924, 42 s.
55. Vesterdal, L., Dalsgaard, M., Felby, C., Raulund-Rasmussen, K., Jörgensen, B.B.: Effect of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor on Norway spruce stands. Forest Ecology and Management, ročník 77, s. 1-10, DOI: 0378-1127(95)03579-6
56. Zelený, R.: Základní vlastnosti měřících přístrojů. SNTL Praha, Praha 1976, 183 s.
57. Žlábek, P.: Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku. Disertační práce, ZF JČU České Budějovice 2009, 106 s.
58. Žoužela, M., Šulc, J.: Metodický návod pro výpočty nejistot při provádění měření za účelem stanovení průtoků a posuzování funkční způsobilosti měřidel. 2. vydání, LVV FAST VUT Brno, Brno 2001, 40 s.
59. Žoužela, M.: Modelový a provozní výzkum vestavěného prvku pro měření průtoku v systémech prizmatických koryt s volnou hladinou. VUT FAST Ústav vodních staveb, Brno 1999, 20 s.