



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra krajinného managementu

Bakalářská práce

Měření průtoků a metody hodnocení časových řad průtoků

Autor práce: Tomáš Hoch

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

České Budějovice

2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

Podpis

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá způsoby, které se používají pro měření průtoků. V literární rešerši jsou popsány způsoby, které se v praxi běžně používají a ke každé je napsán postup měření, podle kterého se zjišťuje hledaný průtok. Dále jsou popsány některé z metod pro hodnocení hydrologických časových řad, pomocí kterých se získávají důležité informace o daném vodním toku a jeho vodním režimu.

Následuje praktická část, popisující zvolené povodí a změny v krajině, které zde nastaly po roce 1989. Pro zvolené povodí jsou naměřené denní průtoky pomocí vybraných metod hodnoceny a poté je sledován průběh a změny v odtokovém režimu daného povodí. Tyto změny jsou graficky zaznamenány a jsou popsány důvody, které je způsobily.

Klíčová slova: měření průtoků, hydrometrická vrtule, hydrologická časová řada, konsumpční křivka, Lomnice, ArcMap

Abstract

This bachelor thesis deals with the methods that are used to measure water flows. The literature research describes the methods that are commonly used and for each is written a measurement procedure, according to which we find the required water flow. In addition, some of the methods for evaluating hydrological time series are described, which are used to obtain important information about the water stream and its water regime.

Following practical part describes the selected river basin and changes in the landscape that occurred there after 1989. For selected river basin are measured daily flows via selected methods evaluated and then monitored progress and changes in the discharge regime of the basin. These changes are graphically recorded and the reasons that caused them are described.

Keywords: water flow measurement, hydrometric propeller, water flow time series, rating curve, Lomnice, ArcMap

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Bystřickému, Ph.D. za jeho rady, trpělivost, ochotu a odborné vedení práce.

Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Cíl práce.....	8
2	Literární rešerše.....	9
2.1	Průtok vody v korytě	9
2.2	Způsoby měření průtoků vody.....	9
2.2.1	Měření průtoků do nádoby	9
2.2.2	Měření průtoků pomocí přelivů	10
2.2.3	Měření průtoků pomocí měrných žlabů	13
2.2.4	Měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule	16
2.2.5	Měření průtoků pomocí indikátorových metod	17
2.2.6	Měření průtoků pomocí ultrazvuku.....	18
2.2.7	Měření průtoků pomocí konsumpční křivky.....	19
2.3	Metody hodnocení hydrologických časových řad	20
2.3.1	Pomocí popisných statistik.....	20
2.3.2	Empirická čára pravděpodobnosti překročení.....	23
2.3.3	Autokorelační funkce	24
2.3.4	Spektrální hustota.....	24
2.3.5	Dekompozice hydrologických řad	25
2.3.6	Metoda klouzavých průměrů.....	26
3	Metodika	27
3.1	Použitý software	27
3.2	Charakteristika povodí.....	27
4	Výsledky a diskuze	29
4.1	Vývoj land use od roku 1990 do roku 2021	29
4.2	Dešťově a sněhové srážky	31
4.3	Vyhodnocení průtoků řeky Lomnice.....	33

4.3.1	Jednoduchá součtová čára	34
4.3.2	Regresní analýza	35
4.3.3	Mann-Kendallův test.....	37
5	Závěr	39
6	Seznamy	40
6.1	Seznam literatury.....	40
6.1.1	Seznam „klasické“ literatury.....	40
6.1.2	Seznam legislativy	42
6.1.3	Seznam internetových zdrojů.....	42
6.1.4	Seznam zdrojů.....	42
6.2	Seznam obrázků.....	42
6.3	Seznam grafů.....	43
6.4	Seznam tabulek.....	44

1 Úvod

Voda je od počátku vzniku naší Země neodmyslitelnou součástí přírody a života. Její přítomnost ovlivňuje počasí na celé planetě, mění tvar zemského povrchu jako erozní činitel, je velmi důležitou složkou pro všechny živé organismy a předpokladem pro další rozvoj lidské společnosti. Voda se vyskytuje v atmosféře, pod zemským povrchem, a také na povrchu, kde se voda soustřeďuje do potoků, řek a jezer.

Postupem času se lidé naučili s vodou lépe hospodařit a využívat ji, a proto v přírodě na potocích a řekách vznikly rybníky, kanály, jezy a přehradní nádrže. Většina těchto staveb má několik způsobů využití, mezi něž patří např. chov ryb, rekreace, zadržování vody v krajině při nedostatku srážek, lodní doprava, ochrana před povodněmi. Dalším místem, kde je potřeba znát průtok vody, jsou vodní nádrže, které slouží k zásobování velkých měst pitnou vodou. Pro zachování kvality vody je nutné mít dostatečný přítok vody, protože jinak dojde k nadměrnému odkysličení vody, která je následně nepitelná (Patočka, 1956). Od první poloviny 20. století se rozvíjí výroba elektrické energie pomocí vodních elektráren. V posledních letech se k jejich budování začínají opět využívat i menší toky, kde je potřeba zjistit velikost průtoku vody v průběhu roku a následně určit, zda má daný tok dostatečný potenciál pro výstavbu vodní elektrárny (Holata, 2002).

V minulosti lidé používali jednoduché způsoby měření průtoků, které byly aplikovatelné spíše na menší toky. Až s rozvojem nových technologií a způsobů měření, jsme schopni počítat i průtoky na velkých tocích, a s pomocí digitální techniky získáváme výsledky s vysokou přesností. (Pavelková Chmelová a Frajer, 2013).

Průtoky se postupem času začaly nepřetržitě zaznamenávat, čehož dnes využíváme při vytváření hydrologických řad a hydrogramů. Z hydrogramů lze vyčíst maximální a minimální průtok za sledované období a můžeme také pozorovat kolísání průtoku v průběhu roku. Poté se pomocí statistických metod určuje aritmetický denní nebo měsíční průtok a na to navazuje empirická čára překročení těchto průtoků (Patočka, 1956). Na základě těchto statistik je možné porovnávat jednotlivé toky z hlediska jejich vodnatosti a určovat pravděpodobné překročení průtoků na vodním toku. Dalším využitím může být například stanovení výšky hladiny toku při určitých srážkách. Toho je možné využít při stavbě ochrany obyvatel před povodněmi, při stavbě mostů, kdy je potřeba zajistit dostatečnou průtočnou

plochu pod mostní konstrukcí nebo pro zajištění lodní dopravy, kde je potřeba znát minimální výška vody, aby mohl být daný vodní tok dopravně využíván (Starý, 2005).

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je popsání metod pro měření průtoků a následné zpracování a vyhodnocení časové řady průtoků ve zvoleném povodí. K vyhodnocení průtoků jsou použity některé níže uvedené metody, z jejichž výsledků je možné popsat případné změny, které nastaly v odtokovém režimu. Tyto výsledky jsou poté porovnány s výsledky dalších výzkumů, které se zabývaly vyhodnocováním časových řad průtoků.

2 Literární rešerše

2.1 Průtok vody v korytě

Průtok vody v korytě vodního toku definuje Kemel (2000) jako objem vody, který proteče určitým průtočným průřezem, za jednotku času, tedy za 1 sekundu. Průtok vody se označuje písmenem Q a vyjadřuje v m^3/s u větších toků nebo v l/s u menších toků. Pojmem proteklé množství, označuje množství vody, které oteklo průtočným průřezem, za delší časové období, zpravidla za jeden den, měsíc nebo rok a vyjadřuje se většinou v tisících nebo milionech m^3 .

Dalším důležitým pojmem, který Kemel (2000) zmiňuje, je specifický odtok. Specifický odtok vyjadřuje objem vody, který průměrně odtéká z plochy povodí, za určitý čas. Zpravidla je udáván v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ nebo v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, ale lze se setkat i s jednodenním, měsíčním nebo i ročním specifickým odtokem.

2.2 Způsoby měření průtoků vody

Způsoby měření průtoků vody rozděluje Dub et al. (1969) na:

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

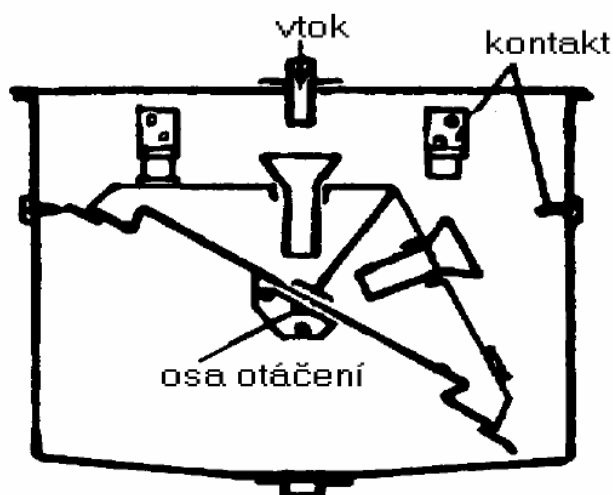
Pavelková Chmelová a Frajer (2013) popisují další způsob měření, který k měření průtoků využívá moderní elektronický přístroj, a tím je ultrazvuk.

2.2.1 Měření průtoků do nádoby

Měření průtoků vody do nádoby je nejstarší a nejjednodušší způsob, kterým lze zjistit množství vody, které protéká daným vodním tokem. Princip měření je velmi jednoduchý, neboť ke zjištění průtoků nám stačí obyčejná nádoba, nejlépe tvaru kvádrů, u které známe její objem. Přehradí se vodní tok a voda se svede tak, aby natékala do zvolené nádoby. Následně se změří doba, po kterou se nádoba plnila a podle vzorce $Q = \frac{V}{t}$, kde V je objem nádoby a t je čas, potřebný k jejímu naplnění, určíme průtok Q . K získání co nejpřesnějšího výsledku, opakujeme měření alespoň třikrát a poté určíme aritmetický průměr, který bude velmi přesně odpovídat skutečnosti. Nevýhodou tohoto způsobu měření je, že ho lze aplikovat pouze na velmi malých tocích nebo pramenech, kde je dostatečný výškový přepad vody. (Jandora et al., 2002; Váša et al., 1982).

Pokud bychom na toku měli jezero nebo nádrž, je možné touto metodou určit průměrný průtok. K tomu je potřeba znát objem dané nádrže a také velikost bilančních prvků, jako je například výpar z vodní hladiny nebo srážky spadlé na hladinu za dobu, která je potřeba k naplnění (Kemela, 2000)

V případě, že potřebujeme měřit delší časový úsek na menším toku, je možné dle Kemela (2000) použít automaticky sklopných nádob (viz obr. č. 2.1). Je to přístroj, který má dvě nádoby trojúhelníkového průřezu. Ty jsou spolu spojené a výkyvné kolem společné vodorovné osy. Po naplnění jedné nádoby dojde k překlopení a začne se plnit druhá. Každé překlopení je zaznamenáno na papír, který je umístěn na válci otáčeném hodinovým strojem, a tím získáváme přehled o počtu překlopení v průběhu času. Objem nádob známe, počet překlopení za určitý čas také, takže vynásobením objemu počtem překlopení, zjistíme průtok za určitý čas.



Obrázek č. 2.1: Automaticky sklopné nádoby (Bumerl, 2003)

2.2.2 Měření průtoků pomocí přelivů

Průtok lze měřit také přepadem, který je definován jako výtok otvorem, jehož horní hrana nezasahuje do proudu vytékající vody. Boor et al. (1968) dále vysvětlují, že přepad vzniká většinou uměle a to tak, že se napříč proudem vytvoří jez nebo hráz. Tato vodní stavba způsobí vzednutí hladiny vody a nakonec začne voda přes tuto překážku přetékat. Místo, kde voda přetéká danou hráz, nazýváme přeliv a přepadající proud vody přepadový paprsek.

Přelivy se dělí podle tvaru a tloušťky přelivu na přelivy jezové, přelivy se širokou korunou, přelivy zvláštní a přelivy ostrohranné. V této bakalářské práci se zabývám pouze ostrohrannými přelivy, protože ty jsou na přírodních tocích nejvíce využívány k měření průtoků a lze z nich také získat nej přesnější výsledky.

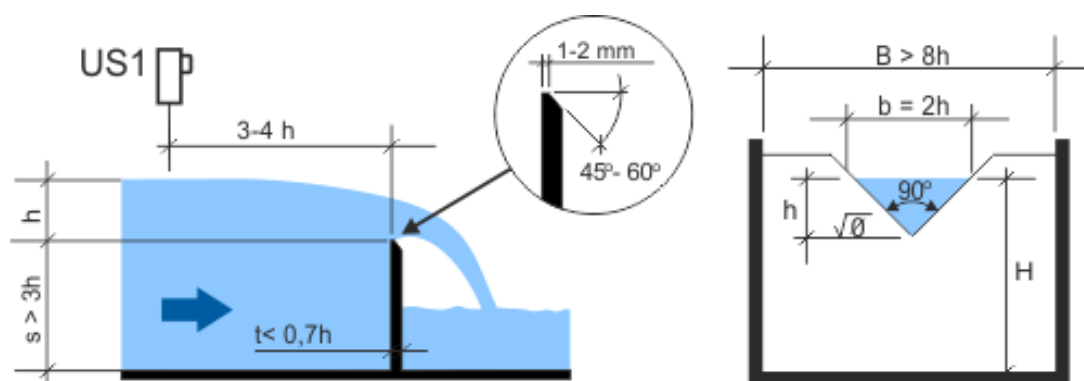
Ostrohranné přelivy mají tloušťku přelivné stěny t menší než $0,67h$, kde h značí výšku přetékající vody. Toto tenké provedení hrany zajistí, aby došlo k odtržení přepadového paprsku od přelivu. Podle tvaru přelivu se dělí na obdélníkové (Bazinův a Ponceletův), trojúhelníkové, lichoběžníkové (Cippolettiho) popřípadě i kruhové, ale mohou být také složené přelivy, například trojúhelníkový s obdélníkovým, nebo dva obdélníkové apod. (Pelikán et al., 1988).

Trojúhelníkový přeliv

U malých průtoků je velmi vhodné použít pro měření průtoků přeliv s rovnoramenným trojúhelníkovým výřezem, jehož vrcholový úhel může nabývat hodnot v rozsahu $20^\circ - 120^\circ$. Pomocí tohoto přelivu lze vypočítat i velmi malé průtoky, ale nevýhodou je velmi snadné zanesení splaveninami, například větviemi. Výška přepadové vody se stanovuje před přelivem ve vzdálenosti, která odpovídá přibližně trojnásobku výšky přepadové vody. V případě, že se správně určí tato výška, nejlépe elektronickým přístrojem, můžeme dosáhnout pomocí těchto přelivů velmi vysoké přesnosti (Boor et al., 1968).

Nejčastěji je používán Thomsonův přeliv (viz obr. č. 2.2) s vrcholovým úhlem 90° . Vzorec pro výpočet průtoku na tomto přelivu je: $Q = 1,4h^{2,5}$, kde h je výška přepadové vody (Šlezinger, 2006).

Pro jiný vrcholový úhel v rozmezí od 20° do 120° lze použít Graveho vzorec $Q = 1,331(\tan \frac{\alpha}{2})^{0,996} h^{2,47}$, kde α je vrcholový úhel a h přepadová výška (Boor et al., 1968).



Obrázek č. 2.2: Thomsonův přeliv (www.fiedler.company/cs)

Bazinův přeliv

Bazinův přeliv má obdélníkový tvar přelivu a nemá žádné zúžení, takže přelivová hrana je stejně široká jako koryto vodního toku. Pro správné měření musí být zajištěn

stejný atmosférický tlak pod přepadovým paprskem, kterého lze docílit například vyvedením trubky pod přepadový paprsek (Roub a Pech, 2003).

Roub a Pech (2003) a Havlík (2001) uvádějí Bazinovu rovnici pro výpočet průtoku, která má tvar: $Q = mb\sqrt{2gh^{3/2}}$; b je šířka přelivu v metrech, g je gravitační zrychlení, h je výška přepadové vody, m je součinitel přepadu, který se získá ze vzorce $m = \left[0,405 + \frac{0,003}{h}\right] * \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s_1}\right)^2\right]$, s_1 označuje výšku přelivné hrany od dna před přelivem.

Ponceletův přeliv

Ponceletův přeliv je velmi podobný Bazinovu, ale liší se tím, že je zde obdélníkový přeliv bočně zúžený. Stanovení výšky u obdélníkového přelivu nemusí být tak přesné jako u trojúhelníkových, protože případná chybně změřená výška se ve výpočtu umocňuje číslem 1,5, zatímco u trojúhelníkových přelivů je to 2,5. Z tohoto důvodu je možné při tomto měření používat i méně přesné a také levnější přístroje (PARS AQUA, 2009). Výpočet se provádí dle Boora et al. (1968) přes Bazinův vzorec, který má ale jiný součinitel přepadu a to:

$$m = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \left(1 - \frac{b}{B}\right)\right] * \left[1 + 0,55 \left(\frac{S}{S_0}\right)\right]$$

kde:

b značí délku přelivné hrany,

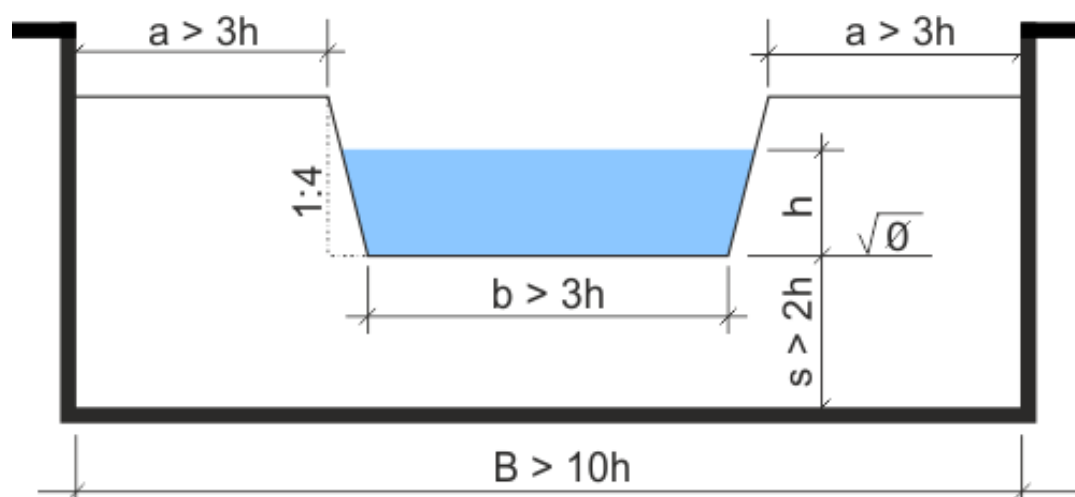
B označuje šířku koryta toku

S (m²) je průtočná plocha ve výřezu přelivu

S₀ (m²) průtočná plocha původního koryta

Cippolettiho přeliv

Posledním typem přelivu je Cippolettiho lichoběžníkový přeliv (viz obr. č. 2.3), který má sklon boků v poměru 1:4 a šířka přelivu musí být alespoň třikrát větší než je přepadová výška. Výpočet průtoku se provádí vzorcem $Q = 1,86bh^{1,5}$, kde b je šířka přelivu (Šlezinger, 2006; Boor et al., 1968).



Obrázek č. 2.3: Cippolettiho přeliv (www.fiedler.company/cs)

Výhody a nevýhody přelivů

Pokud se zajistí přesné stanovení hodnot nutných pro měření, jedná se o přesnou metodu měření, která má možnost velkého měrného rozsahu. Mezi hlavní nevýhody patří náročnost instalace na daný tok a časté zanášení přelivů splaveninami, které následně zkreslují měření.

2.2.3 Měření průtoků pomocí měrných žlabů

Dalším způsobem měření průtoků je měření pomocí měrných žlabů. Touto vestavbou do vodního toku, se zúží průtočný profil koryta, zvýší dno žlabu nebo obě varianty současně a tím dojde ke zvýšení rychlosti proudění vody (Kříž et al., 1979). Měrné žlaby dělíme na žlaby s dlouhým hrdlem a na žlaby bez hrdla. Žlaby s dlouhým hrdlem mají převážně rovnoběžné proudnice, jsou odolnější proti vlnění, mají rovnoměrnější rychlostní profil a jsou tedy přesnější než žlaby bez hrdla, které tyto vlastnosti nemají. Nejznámějšími žlaby jsou Parshallův, Venturiho, Saniiri, Montana, Palmer-Bowlus, Leopold-Lagco a žlaby pravoúhlého-lichoběžníkového průřezu (Pytl, 2004).

Parshallův žlab

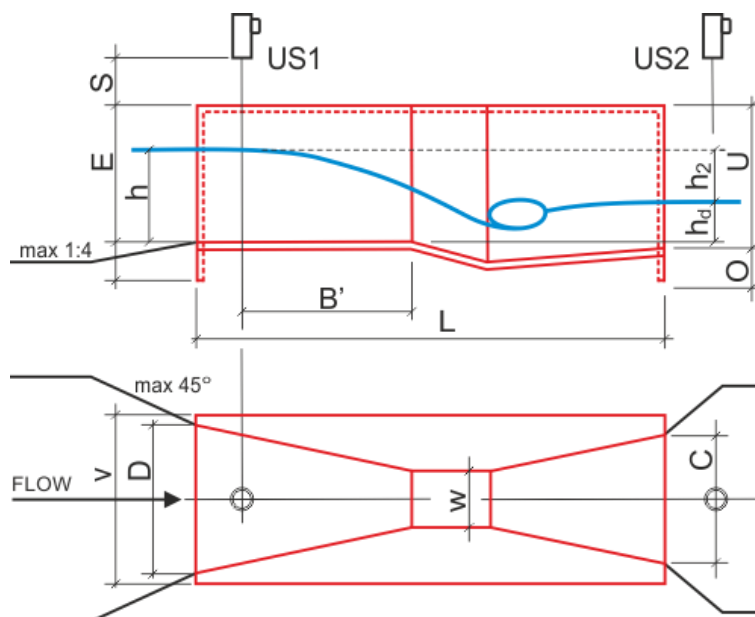
V místech s vyrovnaným rozsahem průtoků je vhodné použít pro měření průtoků Parshallův žlab, který řadíme mezi žlaby s dlouhým hrdlem. Pokud jsou ve vodě obsaženy sedimenty nebo jiné látky, usadí se převážně před měrným profilem a neovlivňují tak měření, které má nejistotu +/- 4% (PARS AQUA, 2009).

Bartušek (1985) říká, že je složen z bočně se zužující části s vodorovným dnem, které je výš, než přívodní dno. Následně je hrdlo s rovnoběžnými stěnami, kde se dno svažuje dolů. Poslední částí je rovnoměrně se rozšiřující konec žlabu se stoupajícím dnem (viz obr. č. 2.4 a 2.5).

Pro výpočet průtoku se používá vzorec $Q = k * b * h^n$, kde neznámé k , b , n jsou určeny dle konkrétního žlabu (hodnota n se u každého Parshallova žlabu blíží 1,5) a h je výška přepadové hladiny, která se měří v přesně daném místě zužujícího se žlabu (Bartušek, 1985).



Obrázek č. 2.4: Parshallův žlab (www.pars-aqua.cz)

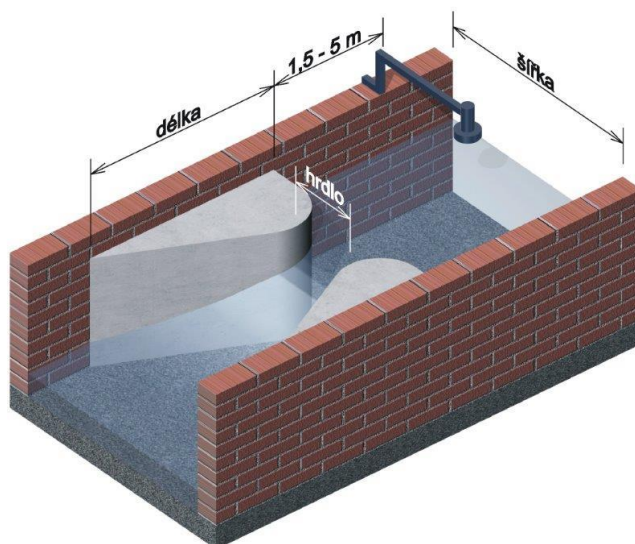


Obrázek č. 2.5: Podélný řez Parshallovým žlabem (www.fiedler.company/cs)

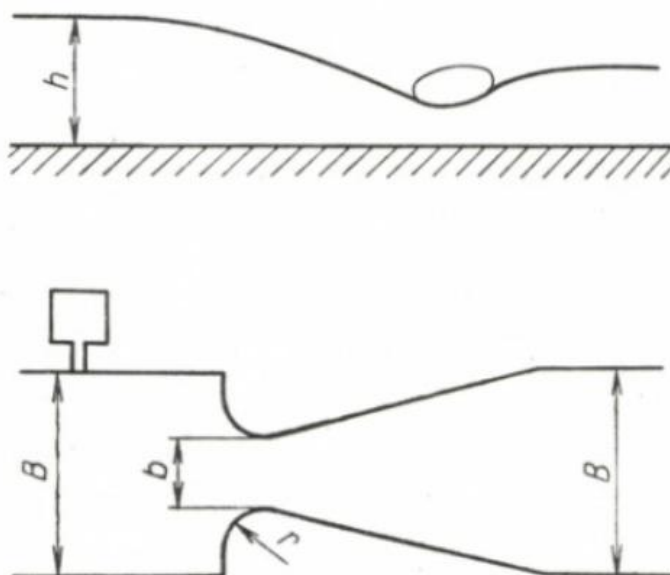
Venturiho žlab

Dalším typem měrného žlabu je Venturiho žlab, který zařazujeme mezi žlaby bez hrdla. Při projektování tohoto žlabu je nutné zohlednit, že ke svému správnému fungování potřebuje, v porovnání s Parshallovým žlabem, vyšší minimální průtok. Oproti Parshallovu žlabu, má větší nejistotu měření a to +/- 7% (Pytl, 2004).

Tento typ žlabu má po celé své délce vodorovné dno. V hrdle žlabu dochází v důsledku zúžení průtočného profilu ke zvýšení hladiny a poté se žlab opět rozšiřuje do původní šířky. Pro výpočet průtoku se výška hladiny měří ve vzdálenosti trojnásobku její velikosti, aby se eliminovalo zkreslení v důsledku působení žlabu (viz obr. č. 2.6 a 2.7).



Obrázek č. 2.6: Venturiho žlab (www.pars-aqua.cz)

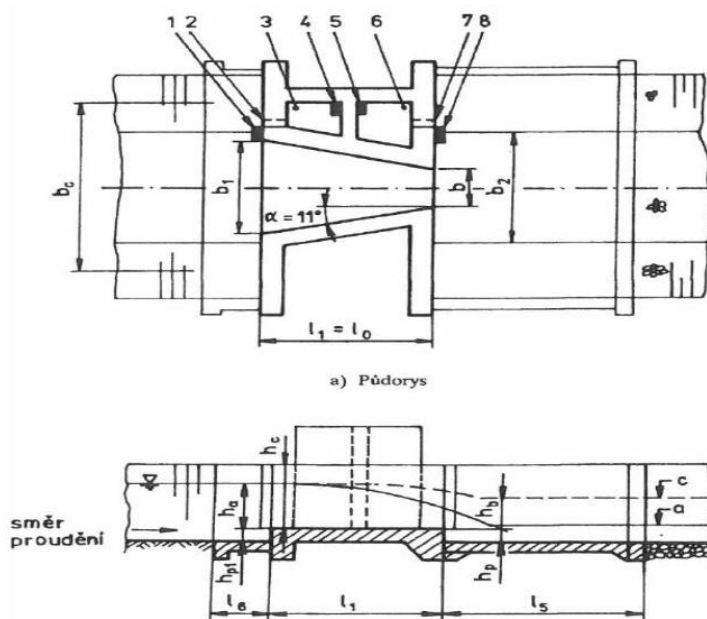


Obrázek č. 2.7: Podélný řez Venturiho žlabu (Bartušek, 1985)

Žlab Saniiri

Tento žlab je velmi podobný Parshallovu žlabu, ale je konstrukčně jednodušší, protože nemá hrdlo a koncovou rozšiřující část. Skládá se z vodorovného dna, které je na konci zakončeno stupněm, a bočně zužujících se stran, které svírají úhel 11° vzhledem k ose žlabu (viz obr. č. 2.8). Součástí žlabu je také uklidňovací šachta,

kteřá slouží ke stabilizaci vodní hladiny a k jejímu následnému přesnému odečtu (ČSN ISO 9826).

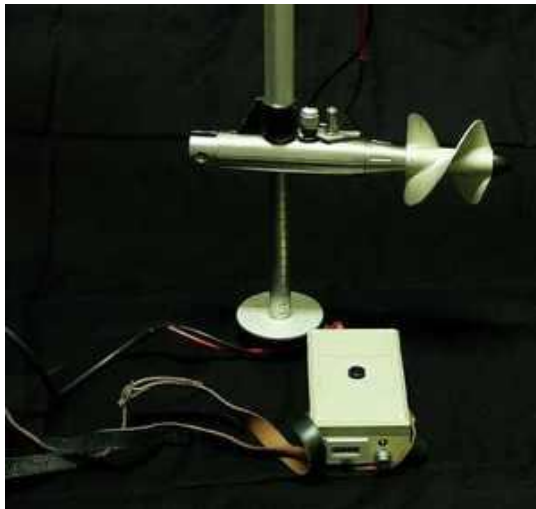


Obrázek č. 2.8: Žlab Saniiri (ČSN ISO 9826)

Měrné žlaby se využívají zejména při měření průtoků na odpadních tocích a u čistíren odpadních vod, kde nedochází k jejich zanášení, jako je tomu u přepadů. Další výhody oproti přepadům jsou dlouhá životnost, protože se většinou vyrábějí z betonu nebo oceli, možnost výstavby v místech, kde není možné větší vzdutí hladiny a měření větších průtoků. Naopak jejich nevýhodami jsou nutnost trvalého usazení, nepřesnost měření pokud není dokonale svisle a vodorovně usazen, nemožnost využití na tocích s větším spádem a vysoké požadavky na přesnost výroby prefabrikátu (Kříž et al., 1979).

2.2.4 Měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule

Průtok vody je možné zjišťovat také z rychlosti proudění v daném toku. Pro tento způsob měření je zapotřebí hydrometrická vrtule, což je vrtule šroubovitého tvaru, připevněná na tyč nebo lano. Vrtule je připevněna na otočném kloubu, umožňujícím správné natočení vrtule proti směru proudu (viz obr. č. 2.9). Na tyči je vyznačena délková stupnice s dělením většinou po centimetrech, pomocí které určíme hloubku ponoření vrtule. Rychlost proudění je následně stanovena dle počtu otáček vrtule za určitý čas (Bezdiček, 1966). Dříve se používaly hydrometrické vrtule s mechanickým ukazatelem počtu otáček, ale dnes jsou všechny tyto přístroje vybaveny mikropočítačem, který nám velmi přesně a rychle určí rychlost proudění v daném místě koryta toku (Jandora et al., 2002).



Obrázek č. 2.9: Hydrometrická vrtule (<https://cksvv.vuv.cz>)

Rychlost proudění vody v korytě není dle Mattase (2014) stejná ve všech částech průtočného profilu, ale mění se s hloubkou a vzdáleností od břehu. Ke zjištění celkového průtoku je potřeba vyhledat rovný úsek koryta toku, nejlépe s nízkými břehovými porosty a pravidelným dnem. Dále je potřeba rozdělit průtočný profil na měrné svislice v pravidelné vzdálenosti, ve kterých se provede série měření hydrometrickou vrtulí. Mohou se provádět dvě, tři nebo pět měření ve svislici, přičemž při provedení pěti měření - u dna, v jedné, ve třech a ve čtyřech pětinach hloubky a těsně pod hladinou - jsou výsledky nejpřesnější. Získané rychlosti se poté zadají do vzorce pro vypočtení rychlosti v dané svislici. Vynásobením této rychlosti a průtočné plochy měrné svislice dostaneme průtok v této jedné svislici. Celkový průtok zjistíme sečtením průtoků ve všech měrných svislicích. Tento početní postup je ale velmi náročný, především stanovení průtočné plochy, a proto se dnes ke stanovení průtoků početní metodou používají převážně počítačové programy.

Kemel (2000) uvádí, že průtok lze zjistit také pomocí grafických postupů, kterými jsou například metoda Harlechera, metoda Culmana nebo použitím tachygrafické křivky.

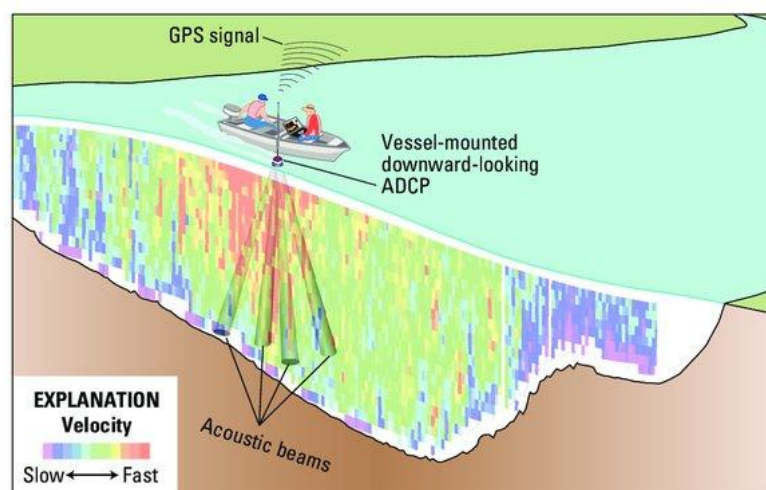
2.2.5 Měření průtoků pomocí indikátorových metod

Průtoky na horských tocích a tocích s velmi kamenitým dnem nelze měřit metodou hydrometrické vrtule nebo přelivy, a proto se k jejich stanovení používá chemická metoda. Na horním profilu se do toku nasype chemikálie – nejčastěji roztok kuchyňské soli – která se vlivem proudění dostatečně promíchá s okolní vodou a na dolním profilu změříme, o kolik se změnila koncentrace látky ve vodě (Jandora et al., 2002).

Davie (2008) rozlišuje dva způsoby měření průtoku. Prvním způsobem je jednorázové nalití chemikálie do vodního toku. Následně dochází vlivem proudění k jejímu naředění. Vzdálenost místa odebrání vzorku vody od místa vlévání, musí být stanovena tak daleko, aby došlo k dokonalému promíchání chemikálie. Zjišťovaný průtok se určí ze známého množství chemikálie a jejího zředovacího poměru. Druhým způsobem je postupné rovnoměrné vlévání chemikálie do toku. Výhodou této metody je, že se získá měření za delší časový úsek než v případě první metody, výsledek je tedy přesnější, ale nevýhodou je vyšší spotřeba chemikálie a delší časová náročnost. Ke stanovení průtoku se použije vzorec $Q = q * \frac{C_t - C_d}{C_d - C_0}$, kde q je dávkované množství chemikálie za jednu vteřinu, C_t koncentrace roztoku chemikálie dávkované do toku, C_d koncentrace v místě odebírání vzorku a C_0 je přirozená koncentrace chemikálie ve vodním toku.

2.2.6 Měření průtoků pomocí ultrazvuku

Jenčík (1998) a Pavelková Chmelová a Frajer (2013) uvádí nejmodernější způsob, kterým lze měřit průtok vody v korytě, a tím je ultrazvuk. Prvním typem je ultrazvukový průtokoměr využívající Dopplerova jevu (viz obr. č. 2.10), kdy se vyslaný zvuk odráží od částic nebo vzduchových bublin ve vodě. Dojde tak ke změně frekvence, kterou průtokoměr změří, porovná s původně vyslanou frekvencí a vyhodnotí rychlost proudění vody.

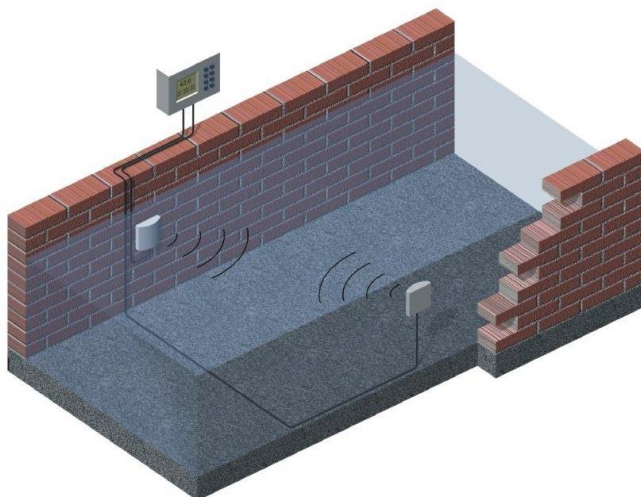


Obrázek č. 2.10: Ultrazvukové měření pomocí Dopplerova jevu

(www.researchgate.net)

Pokud nejsou ve vodě částice, od kterých by se mohl zvuk odrazit, mohou se dle Jenčíka (1998) použít dva ultrazvukové přístroje. Ty se umístí do vodního toku na strany břehu, ale nejsou na stejné úrovni, a vysílají proti sobě zvukové signály. Jeden

vysílá po směru proudění, druhý proti směru proudění (viz obr. č. 2.11). Časový rozdíl mezi oběma signály se vyhodnotí, na základě jejich rozdílu se stanoví průměrná rychlost proudění, která se vynásobí průtočnou plochou a získá se celkový průtok.



Obrázek č. 2.11: Ultrazvukové měření průtoku (www.pars-aqua.cz)

2.2.7 Měření průtoků pomocí konsumpční křivky

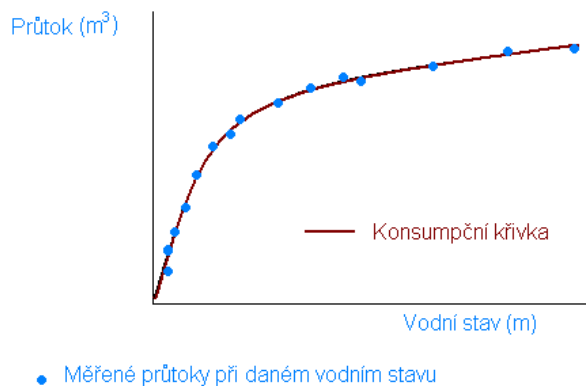
Další možností je měřit průtok pomocí konsumpční křivky. K tomu je zapotřebí určit výšku hladiny. K měření výšky hladiny se používají vodočty (viz obr. 2.12) Jedná se o vodočetnou lať s dělením po dvou centimetrech, která je připevněna na bočním svahu vodního toku nebo na mostní konstrukci. Hodnoty decimetrů jsou značeny arabskými číslicemi, hodnoty metrů se pak značí římskými číslicemi. Nulová hodnota výšky na vodočtu se stanovuje tak, aby i při nejnižším poklesu hladiny toku nebyla dosažena (Netopil, 1981).

Pro nepřetržitě měření výšky hladiny se používá limnigraf. Tento přístroj je umístěn v šachtě vedle koryta řeky, kde je ustálená hladina. Přístroj je složen z otočného válce, na který se pomocí zapisovací jehly s plovákem zapisuje nepřetržitě výška hladiny. Na otočný válec je možné zapisovat údaje o výšce hladiny po dobu až 7 dnů, poté je potřeba jeho výměna za nový (Bezdiček, 1966). S rozvojem moderních technologií se přešlo na digitální zapisování údajů a měření výšky hladiny se v současnosti provádí pomocí ultrazvuku (Pavelková Chmelová a Frajer, 2013).



Obrázek č. 2.12: Vodočetná lať (www.d34-a.sdn.cz)

Pro sestavení konsumpční křivky je potřeba určit průtok vodního toku při různých výškách hladiny. Čím více je k dispozici výsledků měření, tím je křivka přesnější. Průtok se zjistí hydrometrováním pomocí hydrometrické vrtule nebo ultrazvuku. Získané hodnoty se vynesou do grafu, kde se vyrovnají vhodnou metodou a následně se sestojí konsumpční křivka (viz obr. 2.13), která má většinou tvar paraboly. Výslednou křivku je možné použít k určení průtoků při libovolné výšce. Díky tomu je možné získávat nepřetržité hodnoty o průtoku s dostatečnou přesností a relativně jednoduše (Kunštátský a Patočka, 1971; Kemel, 2000).



Obr. č. 2.13: Konsumpční křivka (www.wikimedia.org)

2.3 Metody hodnocení časových řad průtoků

2.3.1 Pomocí popisných statistik

Statistické metody se v hydrologii používají k popisování datových souborů, díky kterým získáme charakteristiky dané veličiny a hustotu pravděpodobnosti, která vyjadřuje pravděpodobnost jejího možného výskytu. Nejvíce zjišťovanými charakteristikami jsou aritmetický průměr, minimum, maximum, medián,

směrodatná odchylka a disperze, koeficient variace a koeficient asymetrie (Starý, 2005).

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je základní statistickou charakteristikou průtoku a označuje průměrný průtok určovaného statistického souboru. Většinou se jedná o měsíční nebo roční průtok. Vypočte se sečtením průměrných průtoků za daný měsíc nebo za hydrologický rok (od 1. listopadu do 31. Října) a poté se vydělí počtem sledovaných let. Míra přesnosti výpočtu, se odvíjí od počtu sledovaných let a od poměrného zastoupení suchých a vlhkých roků ve statistickém souboru (Jandora et al., 2002).

Minimum, maximum a medián

Minimum se rozumí nejnižší hodnota v datovém souboru, naproti tomu maximum značí nejvyšší hodnotu. Pokud seřadíme hodnoty v datovém souboru od nejnižší po nejvyšší, nebo obráceně, můžeme určit hodnotu mediánu, která tuto seřazenou řadu dělí přesně v polovině na dvě stejně velké části. Pokud je ve statistickém souboru sudý počet prvků, medián se vypočte zprůměrováním dvou prostředních hodnot.

Směrodatná odchylka a disperze (rozptyl)

Směrodatnou odchylku definuje Cipra (1986) jako odmocninu z disperze, neboli rozptylu, který získáme jako průměr druhých mocnin odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru. Když bude hodnota rozptylu blízko nule, bude graf hustoty pravděpodobnosti špičatý a úzký. Naopak čím větší bude hodnota rozptylu, tím bude tento graf plošší a nízký. K výpočtu směrodatné odchylky a rozptylu se používá vzorec:

$$S(Q) = \sqrt{D(Q)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_m)^2}{n-1}}$$

kde:

$S(Q)$ je směrodatná odchylka průtoku daného měsíce

$D(Q)$ je rozptyl průtoků daného měsíce

$Q_{m,i}$ je průměrný průtok daného měsíce v roce i

Q_m je aritmetický průměr průtoků daného měsíce

n je počet roků měření

Koeficient variace

Koeficient variace ukazuje míru variability a používá se při porovnání datových souborů, ve kterých se úroveň dat liší o jeden a více řádů. Je určen jako podíl směrodatné odchylky a dlouhodobého aritmetického průměru (Trizna, 2004).

$$C_v = \frac{S_x}{Q}$$

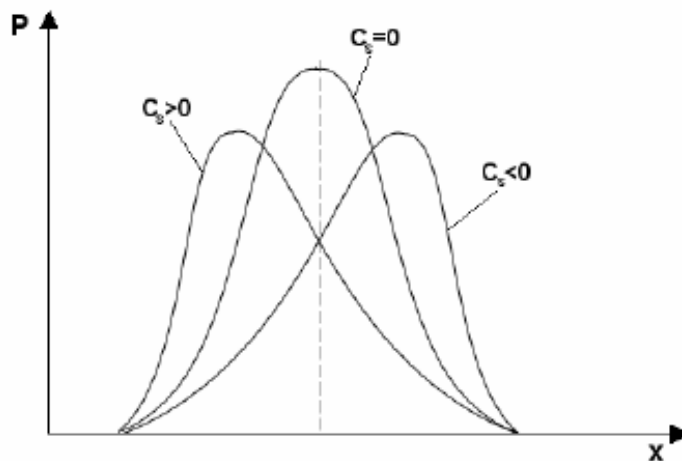
kde: C_v je koeficient variace, S_x je směrodatná odchylka a Q je aritmetický průměr

Koeficient asymetrie (šikmosti)

Starý (2005) a Patočka (1956) popisují koeficient asymetrie jako míru asymetrie jevů kolem aritmetického průměru. Pokud je tento koeficient roven nule, je graf hustoty pravděpodobnosti symetrický. Pokud je koeficient menší než nula, je graf nakloněn doprava, pokud je větší než nula, naklání se graf doleva (viz obr. č. 2.14). Tento koeficient je roven podílu třetího centrálního momentu a třetí mocniny směrodatné odchylky.

$$C_s = \frac{M_3}{\sigma^3}$$

kde: C_s je koeficient asymetrie, M_3 je centrální moment, a je směrodatná odchylka



Obrázek č. 2.14: Graf hustoty pravděpodobnosti (Starý, 2005)

Jednoduchá součtová čára

Pro sledování vývoje odtoku za určité období, se konstruuje jednoduchá součtová čára. Je to čára, která vzniká postupným sčítáním průtoků v průběhu času. Z výsledného grafu je možné pozorovat, jak se tato čára liší od lineárního nárůstu. Jednotlivé odchylky od této lineární křivky znamenají, že došlo k nějaké změně na odtokovém režimu. Mezi nejčastější změny patří například antropogenní úprava vodního toku, změna vegetace v krajině nebo změna srážkových úhrnů (Kemel, 2000).

Regresní analýza

Regresní analýza se používá k vytvoření regresní funkce, která popisuje tvar vztahu mezi dvěma proměnnými, který může být například lineární, logaritmický, exponenciální nebo polynomický. Je možné také stanovit, zda je tato funkce rostoucí nebo klesající (Reiterová, 2003).

Mann-Kendallův test

Pomocí Mann-Kendalova testu je možné porovnat shodu několika časových řad a zjistit jejich trend. Určí se Mann-Kendalova statistika (S), $VAR(S)$ a následně se tyto dvě hodnoty dosadí do vzorce pro výpočet hodnoty Z . Hodnota Z určuje velikost a směr trendu, který je v případě kladné hodnoty rostoucí nebo v případě záporné hodnoty klesající. Důležitost trendu se zpravidla testuje při hladině významnosti menší než 0,05, která se označuje p -value (Ahmad et al., 2015).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i), \text{ kde}$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{když } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{když } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{když } (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$$

kde: X_i a X_j jsou jednotlivá měření seřazená chronologicky

n je délka časové řady

t_p je počet vazeb pro p -tou hodnotu

q je počet vázaných hodnot

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{když } S > 0 \\ 0 & \text{když } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{když } S < 0 \end{cases}$$

2.3.2 Empirická čára pravděpodobnosti překročení

Velmi důležitou čarou, se kterou se v hydrologii setkáváme, je čára pravděpodobnosti překročení. Vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou je určitá hodnota, například průměrný průtok, v průběhu pozorování dosažena nebo překročena (viz obr. č. 2.15). Při stanovení této čáry se hodnoty v datovém souboru seřadí podle velikosti od nejvyšší po nejnižší a následně se pro každou z nich určí pravděpodobnost překročení, například podle Čegodajevova vzorce (Kemel, 2000):

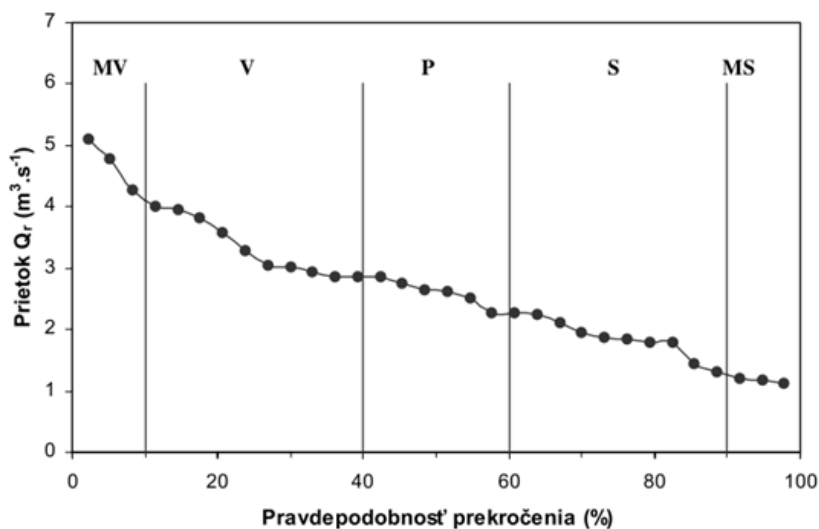
$$P_i = \frac{m-0,3}{n+0,4}$$

kde:

P_i je pravděpodobnost překročení

m je pořadí hodnoty v seřazeném seznam

n je celkový počet hodnot v souboru



Obrázek č. 2.15: Graf empirické čáry pravděpodobnosti překročení

(www.is.muni.cz)

2.3.3 Autokorelační funkce

Autokorelační funkce se používá pro zjišťování závislosti určité veličiny na svých předchozích hodnotách nebo při hledání závislosti periodického chování časové řady. Autokorelační funkce je speciálním typem korelační funkce, která porovnává průtokové řady na zkoumaném měrném profilu s průtokovou řadou stejného měrného profilu. Tím se liší od korelační funkce, která porovnává průtokové řady na libovolném profilu a porovnává je s průtokovou řadou jiného profilu, který je například v jiné části daného toku nebo se nachází na úplně jiném toku. Míru závislosti zkoumaných souborů určuje korelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do 1. Hodnoty -1 a 1 značí nejlepší korelaci, hodnota 0 znamená, že mezi datovými soubory není žádný vztah (Starý, 2005).

2.3.4 Spektrální hustota

Spektrální hustota vznikla Fourierovou transformací autokorelační funkce a slouží k určení délky skrytých period v časové řadě. Pro výpočet spektrální hustoty se používá inverzní Fourierova transformace autokorelační funkce (Cipra, 1986)

$$f = \frac{1}{2\pi} * \left\{ 1 + 2 * \left[\sum_{t=1}^m \left(1 - \frac{t}{m+1} \right) * k * \cos \frac{2\pi t}{T} \right] \right\}$$

kde:

f je spektrální hustota

T je délka periody

k je koeficient korelace

t je počet posunů, řád autokorelační funkce

m je celkový počet kroků autokorelační funkce

2.3.5 Dekompozice hydrologických řad

Pro jednodušší porozumění časovým řadám se provádí jejich rozklad na jednotlivé složky, díky čemuž je možné jim lépe porozumět a předvídat jejich možné budoucí chování. Starý (2005) říká, že rozklad se provádí na čtyři složky, kterými jsou složka trendová, sezónní, cyklická a reziduální. Hydrologické řady dělíme podle vzájemných vztahů mezi těmito složkami na řady s aditivním rozkladem a na řady s multiplikatивním rozkladem.

Pokud je rozklad aditivní, znamená to, že hodnota členů hydrologické řady se rovná součtu všech složek:

$$Q_t = T_t + S_t + C_t + e_t$$

Pokud je rozklad multiplikatивní, hodnota řady se rovná součinu všech složek:

$$Q_t = T_t * S_t * C_t * e_t$$

Trendová složka – T_t

Trendová složka popisuje dlouhodobé změny v chování hydrologické řady. Jednou z nejpoužívanějších metod pro určení trendové složky je metoda klouzavých průměrů, která je popsána v následující kapitole.

Sezónní složka - S_t

Sezónní složka vyjadřuje změny v hydrologické řadě v průběhu jednoho roku. Při hledání změn, se používají řady průměrných měsíčních hodnot zjišťované veličiny. Velmi často jsou tyto změny zapříčiněny hydrologickými podmínkami v průběhu roku. Mohou to být například zvýšené průtoky při jarním tání sněhu nebo naopak letní nízké průtoky v důsledku nižšího množství srážek. Ke stanovení sezónní složky je možné použít například metodu klouzavých průměrů nebo aproximaci periodickými funkcemi.

Cyklická složka - C_t

Tato složka vyjadřuje dlouhodobé kolísání okolo složky trendové. Délka periody cyklické složky se v průběhu času mění, a proto je obtížné její určení. Pro relativně přesný odhad je potřeba mít dlouhodobé pozorování, které následně vyhodnotíme pomocí spektrální nebo filtrační analýzy.

Reziduální složka - e_t

Reziduální složka je složená ze zbývajících hodnot, které vznikly odstraněním trendové, sezónní a cyklické složky. Při rozkladu hydrologické řady je snaha o co největší minimalizaci této složky. Tato složka může obsahovat například chyby měření nebo nepřesnosti při zaokrouhlování.

2.3.6 Metoda klouzavých průměrů

Pomocí metody klouzavých průměrů, je možné určit trendovou složku. Pro stanovení trendové složky je zapotřebí určit délku a řád klouzavého průměru. Délka klouzavého průměru znamená délku skrytých period, které získáme při počítání spektrální hustoty. Cipra (1986) dále říká, že při volbě řádu klouzavého průměru vycházíme ze subjektivního posouzení charakteru dat a je optimální volit co nejnižší řád. Klouzavé průměry se sudou délkou skryté periody se využívají velmi málo, protože vyrovnaná hodnota by se nacházela mezi původními hodnotami a při grafickém znázornění by to bylo matoucí. Proto se používají klouzavé průměry s lichou délkou skryté periody.

3 Metodika

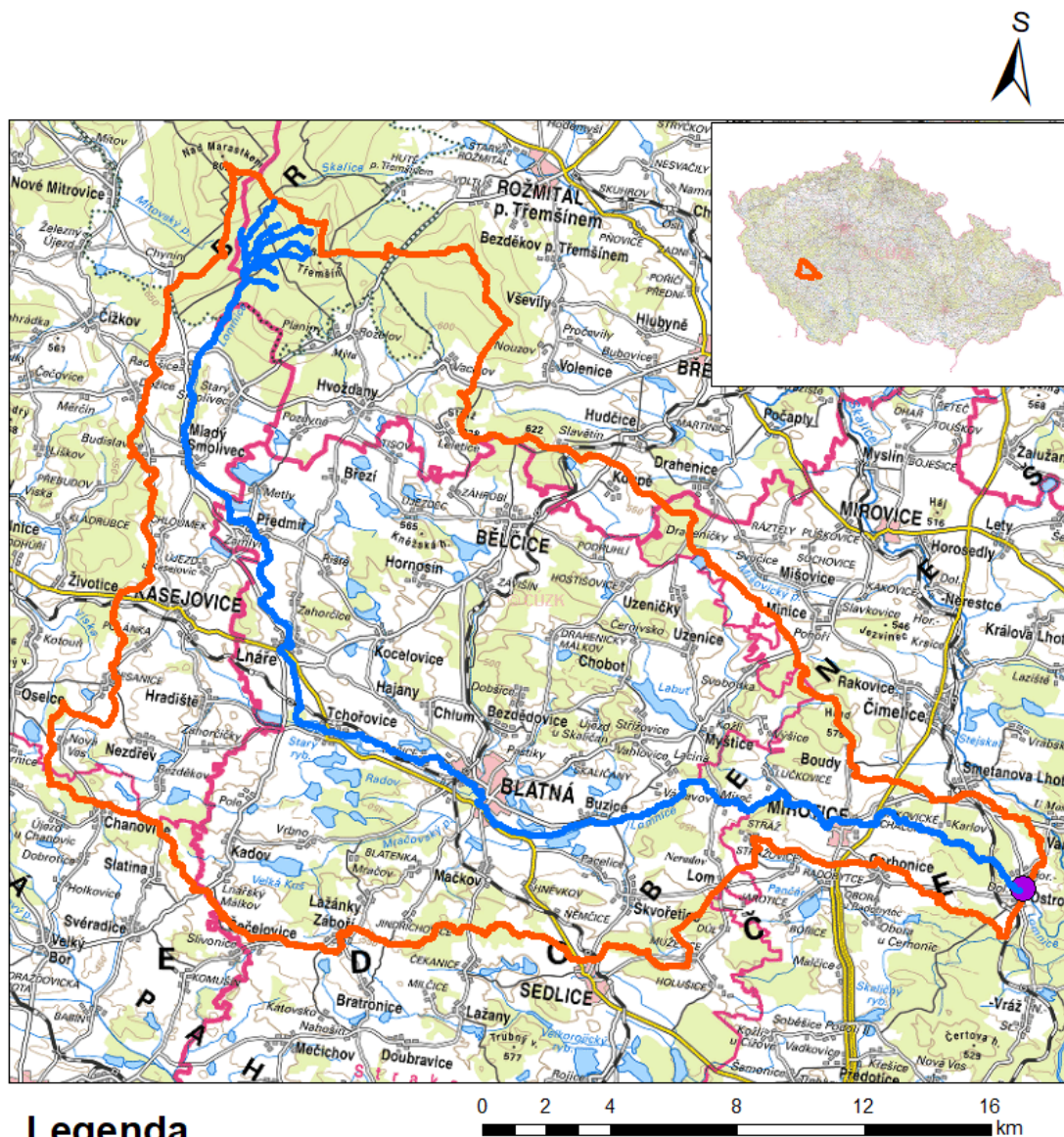
3.1 Použitý software

Mapové výstupy, které jsou uvedeny v této bakalářské práci, jsou vytvořeny v programu ArcMap 10 s připojením webových mapových služeb WMS. Pro zpracování tabulek, grafických a statistických údajů, je použit program Microsoft Excel s rozšířením XLSTAT.

3.2 Charakteristika povodí

Pro zpracování praktické části jsem zvolil povodí řeky Lomnice, která je povodím 3. řádu v povodí Labe, s uzávěrovým profilem v obci Dolní Ostrovec (viz obr. č. 3.1). Řeka Lomnice protéká městy Blatná a Mirovice a její povodí se nachází převážně v severní části Jihočeského kraje, ale částečně zasahuje i do Plzeňského a Středočeského kraje. Délka toku po uzávěrový profil činí 52,4km a plocha povodí po tomto profilu je 391,35km². Lomnice pramení v okolí Třemšína v Brdech, následně se do ní v Blatné vlévá Závišinský potok, který je jejím nejvýznamnějším levostranným přítokem, a 7 km před soutokem s Otavou se v obci Dolní Ostrovec nachází hlásný profil ČHMI. Z tohoto hlásného profilu jsou čerpána data o denních průtocích od 1. listopadu 1980 do 31. října 2019 (veřejně dostupné na stránkách www.chmi.cz), která jsou v další části bakalářské práce vyhodnocena.

Ke zjištění informací o množství dešťových a sněhových srážek v průběhu časové řady, je použita meteorologická stanice Kocelovice, nacházející se v západní části zvoleného povodí u obce Lnáře, v nadmořské výšce 519 metrů. Historická data z této meteorologické stanice jsou volně přístupná na webu ČHMI. Data o srážkách jsou následně porovnána s průměrnými hodnotami první poloviny 20. století, která jsou zapsána v Tabulkách - Podnebí ČSR z roku 1960.



Legenda

- Lomnice
- Uzávěrový profil
- Rozvodnice

Tomáš HOCH
 Březen 2021
 Zdroj: CHMI
 Podklad: ZM 200

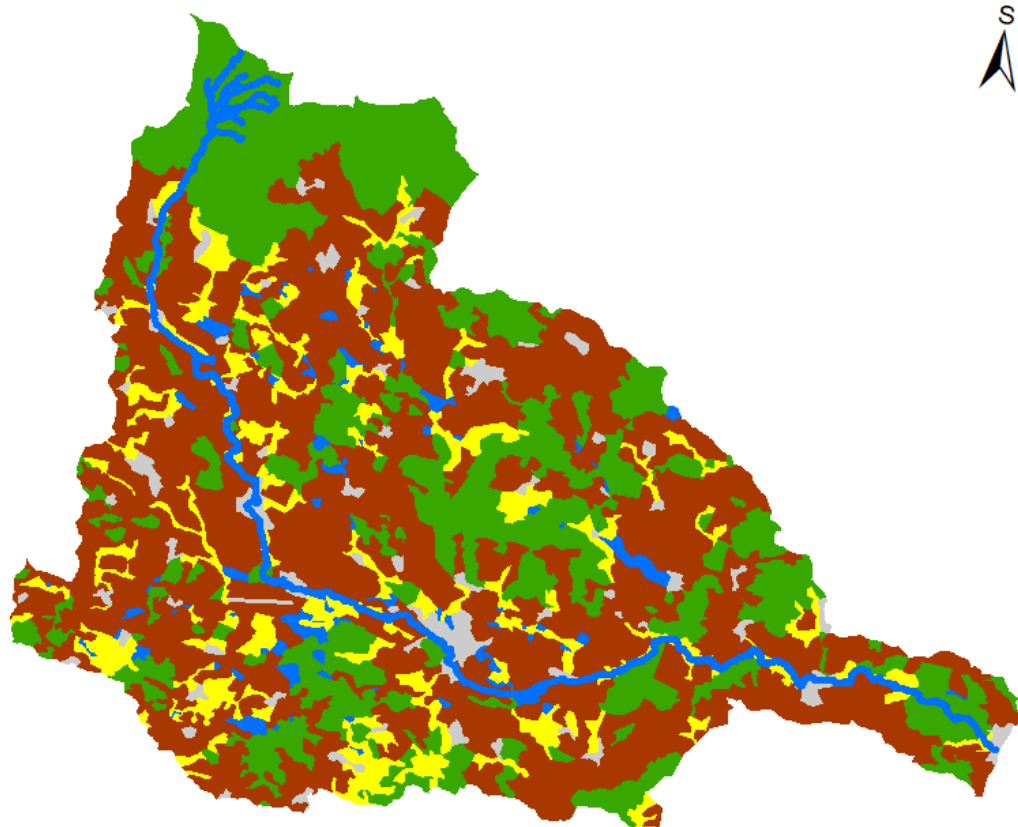
Obr. č. 3.1: Povodí řeky Lomnice (CHMI, zpracování vlastní)

4 Výsledky a diskuze

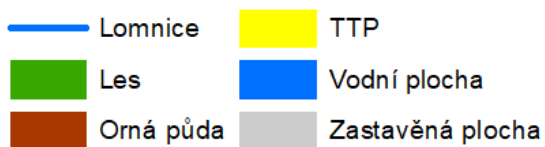
4.1 Vývoj land use od roku 1990 do roku 2021

Před rokem 1989, za vlády komunistické strany, byla snaha o co největší plochu orné půdy, která zapříčinila četné změny v krajině. Tyto změny způsobily zvýšení odtoku, který může být na orné půdě až o 10 % větší než na trvalých travních porostech. Po roce 1989 nastala změna a orná půda se v některých místech opět zatravnila. Tam kde zůstala, se ale často nijak výrazně nezměnil způsob hospodaření a i nadále se pěstuje především obilí, řepka olejka a kukuřice. Pro zlepšení zasakování vody do půdy a současné snížení množství povrchového je nezbytné změnit způsob hospodaření. Pokud se do osevního postupu opět vrátí pícniny a sníží se utužení orné půdy, které je způsobené těžkou mechanizací, je možné snížit povrchový odtok. Tím se zároveň sníží průtok vody v korytě řek, který by jinak nastal při velkých nebo dlouhotrvajících deštích a způsobil povodně (Kvítek, 2013).

Vývoj změny využití krajiny je graficky zpracován v programu ArcMap podle podkladových map. Pro vytvoření land use v roce 1990 (viz obr. č. 4.1) jsou použity mapy Cenia Land Cover 1990 a Archivní ortofoto a pro rok 2021 (viz obr. č. 4.2) mapa LPIS a aktuální ortofoto. Ve výsledném zpracování jsou zobrazeny zastavěné plochy, vodní plochy, lesy, trvalé travní porosty (TTP) a orná půda. Rozloha vodních ploch je od roku 1990 stále stejná a činí 3,1% celkové plochy povodí. Zastavěná plocha se zvýšila ze 4,4 % na 4,6 % a rozloha lesů také, z původních 31,4 % na 31,8 %. Hlavní změny se udály v orné půdě a TTP. V roce 1990 zabírala orná půda 49,5 % rozlohy povodí, tedy téměř polovinu, zatímco TTP pouze 11,6 %. V roce 2021 se snížila plocha orné půdy na 38,7 % a plocha TTP se zvýšila na 21,9 %. Z tohoto srovnání je patrná výrazná změna, která nastala v krajině od roku 1990, kdy došlo k zatravnění jedné pětiny rozlohy orné půdy. Jaký dopad má tato změna na odtokové poměry v povodí a tedy i průtok vody v řece Lomnici je patrné v následující části bakalářské práce.

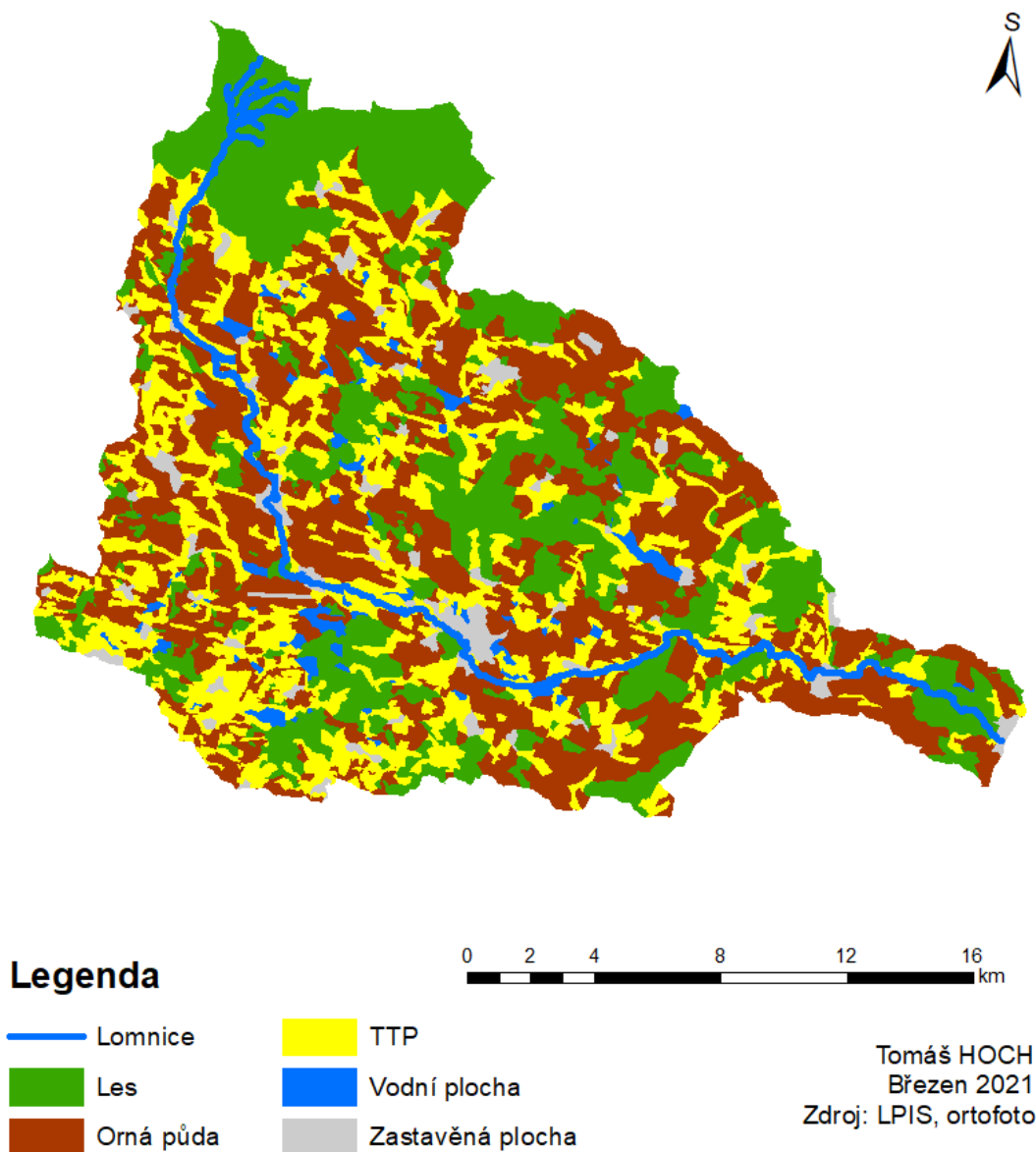


Legenda



Tomáš HOCH
Březen 2021
Zdroj: CENIA, archivní ortofoto

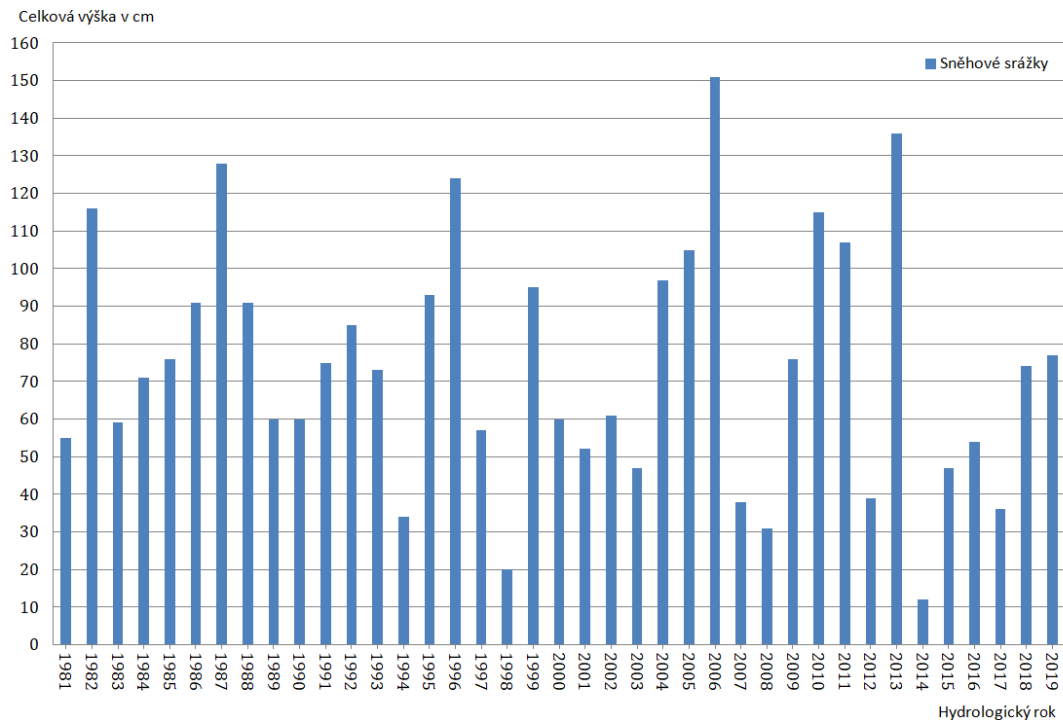
Obr. č. 4.1: Land use povodí Lomnice v roce 1990 (CENIA, zpracování vlastní)



Obr. č. 4.2: Land use povodí Lomnice v roce 2021 (LPIS, zpracování vlastní)

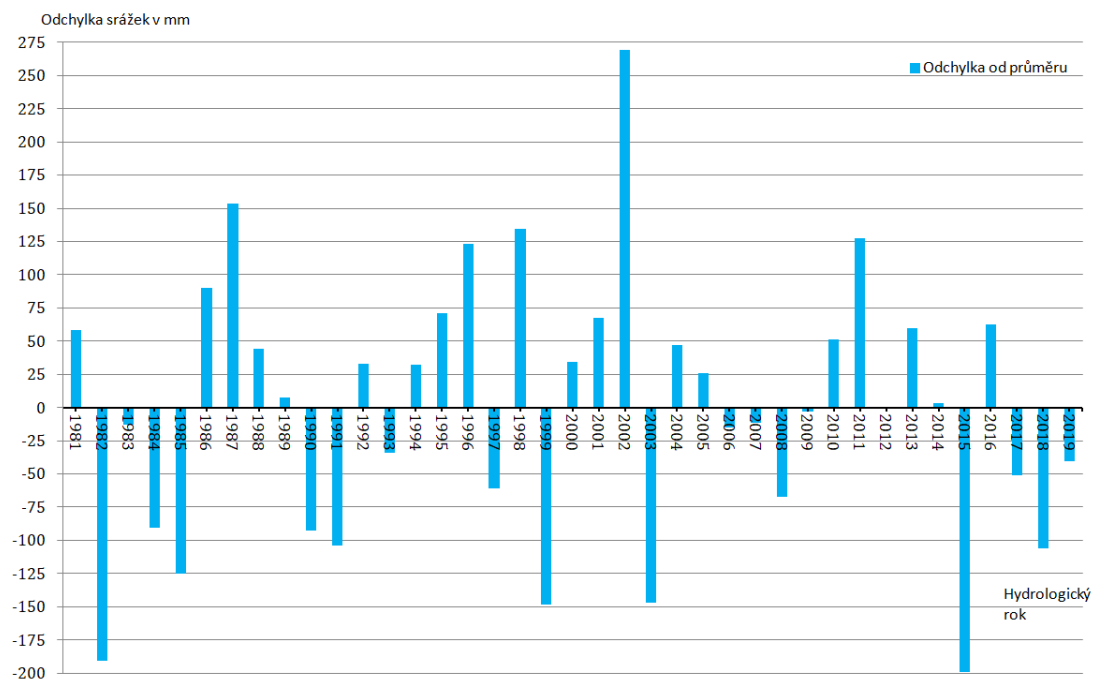
4.2 Dešťové a sněhové srážky

Nedílnou součástí potřebnou pro vyhodnocení změn průtoků, je zpracování statistických údajů pro dešťové a sněhové srážky, které mají na průtok vody v řece velký vliv. Z webových stránek CHMI jsou stažena měsíční data o dešťových a sněhových srážkách, která jsou následně v programu Excel seřazena z běžných roků do hydrologických roků. Hodnoty měsíčních sněhových srážek jsou sečteny pro jednotlivé hydrologické roky a vloženy do sloupcového grafu, který znázorňuje celkové množství ročních sněhových srážek (viz graf č. 4.1), ze kterých je následně možné hodnotit jejich vliv na průtok.



Graf č. 4.1: Roční úhrn sněhových srážek na povodí (CHMI, zpracování vlastní)

Dešťové srážky jsou stejně jako sněhové srážky zpracovány do tabulky na měsíční a roční hodnoty. Pro porovnání ročních hodnot je použita průměrná hodnota dešťových srážek dle tabulek podnebí ČSR (1960), která činí **586mm** a je stanovena dlouhodobým průměrem za období 1901–1950. Od všech ročních úhrnů srážek za zjišťované období je odečtena tato průměrná hodnota a z výsledných hodnot je vytvořen graf, který ukazuje, o kolik se srážky liší oproti průměru (viz graf č. 4.2).



Graf č. 4.2: Odchylka dešťových srážek od průměru (CHMI, zpracování vlastní)

4.3 Vyhodnocení průtoků řeky Lomnice

Údaje o průtocích jsou poskytovány pouze v denních hodnotách a uváděny v m³/s, zatímco sněhové a dešťové srážky jsou dostupné i v měsíčních a ročních hodnotách. Z těchto údajů je opět vytvořena tabulka hodnot, popisující průměrné průtoky v jednotlivých měsících každého roku zkoumané hydrologické řady (viz tab. č. 4.1). Tato tabulka dále obsahuje průměrné měsíční průtoky stanovené průměrem všech měsíčních průtoků za sledované období a údaje o průměrných ročních průtocích, určené váženým průměrem měsíčních průtoků.

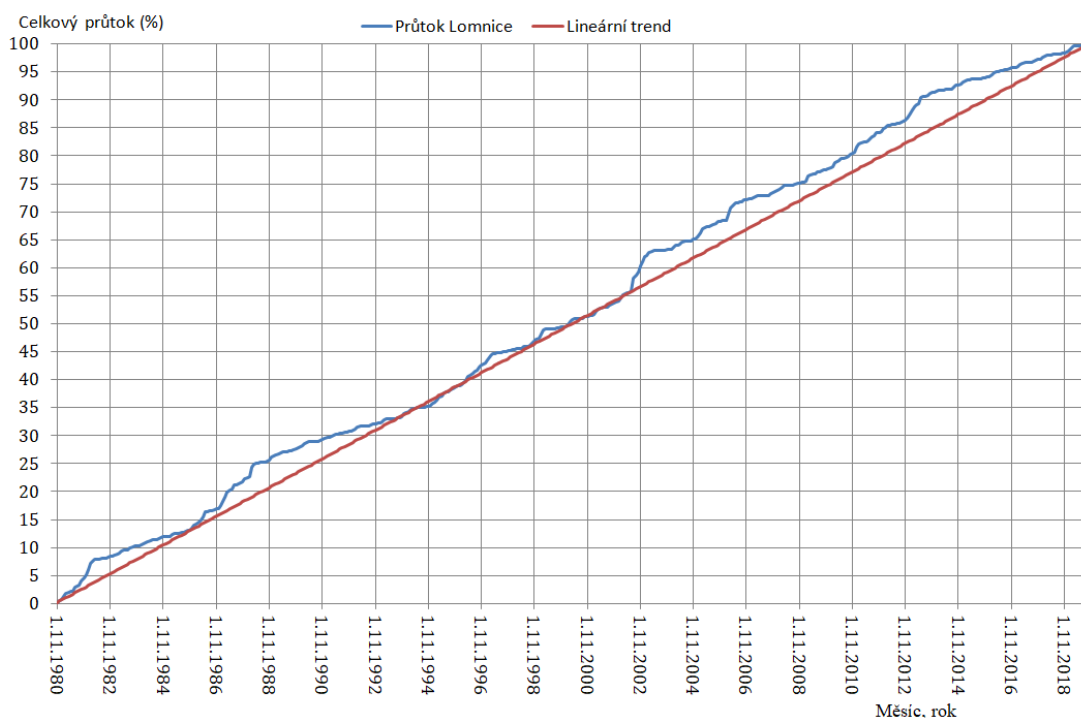
Tab. č. 4.1: Průměrné hodnoty měsíční a ročních průtoků v m³/s (CHMI, zpracování vlastní)

	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Rok
1981	1,51	1,64	1,88	4,39	3,95	0,78	1,04	0,38	5,18	1,52	1,19	5,05	2,38
1982	4,05	5,07	6,22	7,39	3,38	2,32	0,68	0,14	0,18	0,32	0,47	1,30	2,60
1983	0,62	0,24	1,11	1,36	2,07	2,78	1,16	0,32	0,14	2,55	0,79	1,06	1,18
1984	0,55	0,39	0,92	1,29	1,26	1,68	1,13	0,55	0,22	0,22	1,06	2,12	0,95
1985	0,77	0,30	0,17	0,33	1,76	1,26	0,91	0,15	0,11	1,13	0,99	1,11	0,75
1986	0,65	2,50	4,07	0,89	2,53	3,16	4,30	6,02	0,37	0,41	0,42	1,80	2,27
1987	0,68	0,84	3,97	4,31	6,37	6,42	2,24	1,99	4,59	0,92	1,25	1,39	2,90
1988	0,92	3,36	1,34	2,38	11,47	4,46	0,81	0,87	0,25	0,22	0,84	1,31	2,36
1989	0,75	3,89	1,73	1,20	1,51	1,02	0,85	0,53	0,43	0,42	0,96	1,32	1,22
1990	1,01	0,95	0,91	1,59	3,41	1,17	0,61	0,30	0,27	0,07	0,42	1,06	0,98
1991	0,95	0,99	1,26	0,28	1,09	1,95	0,81	0,58	0,64	1,04	0,41	1,00	0,92
1992	0,50	0,52	1,26	1,09	2,15	1,44	0,53	0,19	0,32	0,10	0,41	0,99	0,79
1993	0,85	0,95	0,48	0,55	3,34	0,71	0,15	0,19	0,46	0,08	0,26	1,04	0,76
1994	0,48	3,95	1,62	1,40	2,35	1,83	0,40	0,28	0,14	0,22	0,63	1,17	1,21
1995	0,34	0,32	2,85	1,84	2,02	4,46	1,57	3,81	0,86	0,33	2,24	1,63	1,85
1996	1,37	2,45	1,02	0,51	2,33	3,34	5,89	1,13	2,45	2,56	1,79	3,65	2,39
1997	2,43	1,45	0,96	4,21	5,27	2,56	0,91	0,35	0,49	0,25	0,53	0,99	1,68
1998	0,59	0,74	0,59	0,43	1,22	0,34	0,10	1,57	0,65	0,15	0,76	2,88	0,84
1999	3,17	1,98	1,64	4,93	5,88	1,10	0,52	0,20	0,11	0,02	0,30	1,04	1,72
2000	0,40	0,21	0,40	1,69	5,12	2,68	0,44	0,22	0,05	0,11	0,52	1,89	1,14
2001	0,67	0,55	0,46	1,55	3,38	3,65	1,16	0,70	0,47	0,45	1,67	1,79	1,37
2002	0,81	1,28	2,46	3,09	4,42	1,67	0,64	0,76	1,84	16,73	3,44	4,58	3,50
2003	7,65	4,82	6,61	2,37	4,10	1,14	0,53	0,28	0,14	0,03	0,07	0,40	2,35
2004	0,35	0,27	1,03	2,21	1,84	0,98	0,54	2,93	0,93	0,20	0,37	0,71	1,02
2005	1,39	1,19	1,90	5,03	5,46	1,81	0,99	0,37	0,96	1,24	2,05	2,28	2,04
2006	0,56	0,50	0,47	0,13	7,73	7,57	4,13	2,80	0,79	0,45	0,93	1,83	2,33
2007	0,66	0,35	0,70	1,76	1,40	0,44	0,19	0,14	0,04	0,04	0,39	1,85	0,66
2008	1,09	1,37	1,36	1,40	3,58	1,77	0,68	0,17	0,04	0,03	0,43	1,84	1,15
2009	0,53	0,54	0,48	0,86	6,49	1,78	1,30	0,64	2,24	0,27	0,36	1,41	1,42
2010	0,46	0,74	1,70	1,41	5,26	1,79	1,15	2,09	0,38	1,70	1,36	2,41	1,71
2011	0,78	1,92	7,16	2,95	2,44	0,91	0,59	0,53	2,58	3,04	1,54	3,13	2,31
2012	0,83	0,97	4,07	1,18	2,48	1,11	0,48	0,35	0,55	0,24	1,24	2,29	1,32
2013	0,68	2,93	4,12	5,90	4,39	2,26	2,07	8,57	0,42	0,31	1,30	2,37	2,92
2014	1,17	1,02	0,89	0,74	0,73	0,31	0,71	0,27	0,21	0,22	1,73	2,65	0,89
2015	1,00	0,75	2,55	1,09	1,17	0,93	0,49	0,20	0,05	0,01	0,07	1,02	0,78
2016	0,41	0,83	1,14	1,55	2,99	0,93	0,77	0,67	1,11	0,36	0,54	1,65	1,08
2017	0,64	0,38	0,32	1,24	2,03	1,48	1,77	0,15	0,11	0,08	0,25	1,72	0,85
2018	0,71	0,62	2,09	1,49	1,23	0,79	0,41	0,28	0,24	0,01	0,18	1,41	0,79
2019	0,39	0,37	1,94	3,07	3,20	0,44	0,37	0,13	0,03	0,03	0,23	1,56	0,97
	1,11	1,39	1,94	2,08	3,40	1,98	1,13	1,07	0,80	0,98	0,88	1,81	

Pro hodnocení časové řady průtoků řeky Lomnice jsou zvoleny některé výše uvedené metody a to: jednoduchá součtová čára, regresní analýza a Mann-Kendallův test.

4.3.1 Jednoduchá součtová čára

Prvním způsobem, kterým jsou průtoky na řece Lomnici vyhodnoceny, je jednoduchá součtová čára. Pro její sestavení jsou použity chronologicky řazené měsíční průtoky, ze kterých je sestavena celková suma. V dalším kroku je každá měsíční hodnota vydělena celkovou sumou a vynásobená číslem 100, čímž se získají dílčí velikosti průtoků vyjádřené v procentech. Jednotlivé průtoky se postupně sčítají, vloží se do grafu (viz graf č. 4.3) a vznikne postupně narůstající křivka. Pro lepší pozorování a hodnocení, je v grafu navíc ještě lineárně rostoucí přímka, která značí konstantní nárůst průtoků v průběhu času.



Graf č. 4.3: Jednoduchá součtová čára (CHMI, zpracování vlastní)

Z výsledného grafu lze pozorovat nepravidelnosti, které ukazují zvýšené průtoky v důsledku většího množství srážek, ale také podprůměrné průtoky, kdy byly srážky nižší. Výraznější nárůst průtoků, který lze vidět v jarních měsících v letech 1981, 1987, 1996 a 2006 je způsobený zvýšeným odtokem, v důsledku tání nadprůměrných sněhových srážek. Nárůst v roce 2002 je důsledkem dlouhotrvajících červencových dešťů a následného přívalového deště ze dne 12. 8. 2002, kdy spadlo během jednoho dne 75mm srážek, který způsobil ničivé záplavy. Poslední velký nárůst je v roce 2013, který je způsoben kombinací jarního tání nadprůměrných sněhových srážek a

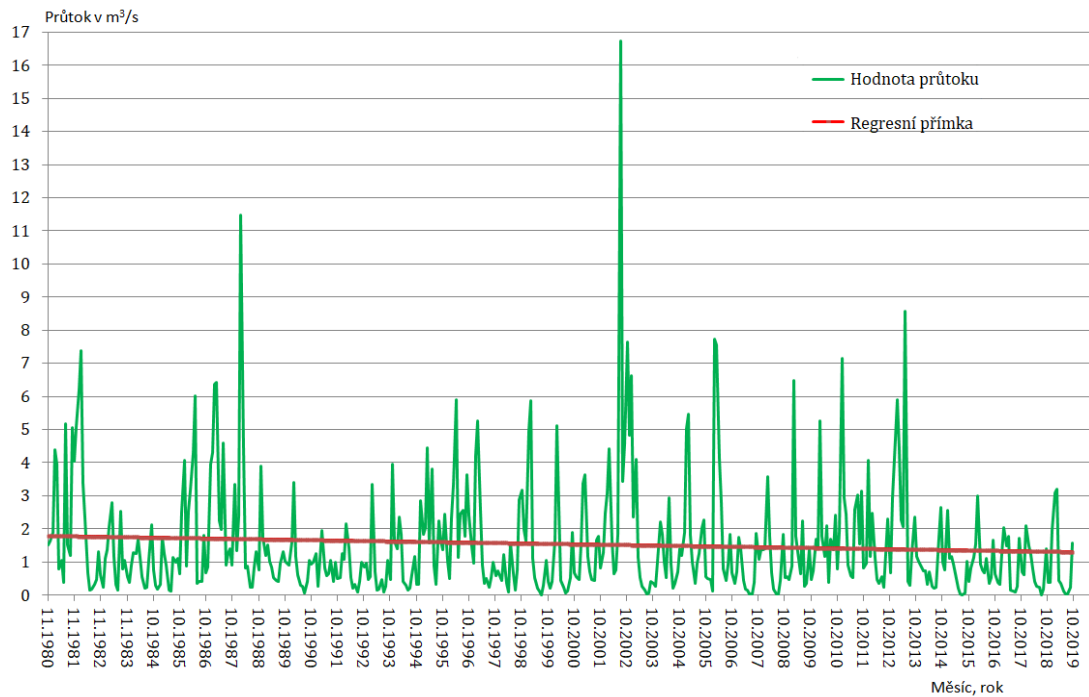
nadprůměrných dešťů v jarním období. Naopak výraznější zploštění grafu značící nižší průtok se vyskytuje v roce 2003, tedy rok po povodních, a v roce 2015. V obou případech jsou důvodem poklesu průtoku nižší letní srážky, které v roce 2003 činili za měsíce červenec a srpen 64mm a v roce 2015 za stejné období pouze 40mm.

Na výši průtoků mají tedy větší vliv srážky než plocha TTP, která může průtok ovlivnit spíše při dlouhotrvajících a méně intenzivních deštích. Kvítek (2017) uvádí, že rychlost vsakování vody závisí na složení půdy. Zatímco těžké jílovité půdy jsou schopny vsakovat pouze 1mm srážek za hodinu, u lehkých písčitých a štěrkovitých půd to může být až 15mm za hodinu. V české republice jsou nejvíce zastoupeny středně půdy, u kterých je rychlost vsakování okolo 4mm srážek za hodinu do doby než dojde k jejich nasycení. Z tohoto zjištění je patrné, že při vydatnějším přívalovém dešti dokáže TTP zasáknout pouze část srážky a zbylá část odeče do vodního toku. Dále zmiňuje, že TTP je oproti orné půdě méně náchylný k půdní erozi a pomáhá tak zadržovat případný půdní smyv, který by se jinak dostal společně s přívalovou srážkou do vodního toku.

V posledních letech se dlouhodobé a méně intenzivní deště vyskytují čím dál tím méně a zvyšuje se intenzita krátkodobých a přívalových dešťů. Siegel (2016) tvrdí, že v důsledku klimatické změny se mění podoba srážek, kdy dochází k prodlužování doby mezi jednotlivými dešti a ke změně jejich intenzity. Při delším období bez deště dochází k tvrdnutí půdy, která následně není schopná zadržet vodu a dochází tak ke zvýšenému odtoku z povodí a dočasnému zvýšení průtoku vodního toku. Tento trend potvrzují také Žalud et al., (2019), kteří se zabývají srážkovými úhrny v nížinách České republiky. Při zkoumání časové řady z let 1961 až 2018, dospěli k závěru, že celkové srážkové úhrny se nijak významně nemění, ale dochází ke zvýšení počtu dnů se srážkami nad 20mm. Zatímco od počátku 70. let až do konce 20. století se počet těchto dnů pohyboval přibližně okolo dvou ročně, ke konci časové řady už to byly dny čtyři.

4.3.2 Regresní analýza

Další metodou, pomocí které jsou průtoky hodnoceny, je regresní analýza. Měsíční průtoky jsou v programu Excel zpracovány pomocí regresní analýzy. Výsledkem je graf průtoků za celou dobu měření, který navíc obsahuje regresní přímku, znázorňující očekávaný vývoj hodnot průtoků v průběhu časové řady (viz graf č. 4.4).



Graf č. 4.4: Graf regresní přímky (CHMI, zpracování vlastní)

Z grafu lze vidět tvar regresní přímky, která je v tomto případě klesající. Z dlouhodobého hlediska je tedy patrné, že průměrná hodnota průtoku na řece Lomnici se snižuje. V roce 1981 byla průměrná hodnota očekávaného průtoku $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, zatímco na konci časové řady, tedy v roce 2019, to bylo $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$. V dalším kroku je nutné určit, zda je tento regresní model statisticky průkazný. Pro jeho stanovení se používá p-value, která musí mít hodnotu nižší než 0,05. V tomto konkrétním případě je hodnota **p-value 0,081**, a to znamená, že **tento regresní model není statisticky průkazný na hladině významnosti $\alpha = 0,05$** . Výsledkem je tedy to, že průtok se sice v čase průměrně snižuje, ale ne o tolik, aby to bylo prozatím statisticky průkazné. Objemy průtoků v českých řekách se zabývá také Vlnas (2015), který na většině vodoměrných stanic v České republice analyzuje časové řady průtoků z let 1971 až 2013. Zvýšení průtoků zaznamenal pouze na jedné pětině vodoměrných stanic a to o 15 % v měsíci březnu, kdy v posledních letech bývají nadprůměrné teploty, čímž dochází k rychlejšímu odtávání sněhové pokrývky a tedy nárůstu průtoků. Ve zbylé části roku jsou trendy průtoků klesající, především v období od května do srpna, kdy zaznamenal pokles průtoků o 10 až 13 % na více než polovině vodoměrných stanic, většinou v oblasti Moravy a severních Čech.

4.3.3 Mann-Kendallův test

Mann-Kendallův test se používá pro zjištění, zda se v časové řadě vyskytuje nějaký trend, a proto je použit v této bakalářské práci. Vstupní data pro tento test tvoří chronologicky seřazené hodnoty průtoků pro jednotlivé měsíce a hodnoty průtoků za rok. Je tedy seřazeno 39 hodnot pro leden (z let 1981 – 2019), 39 hodnot pro únor, atd. a následně je na těchto hodnotách proveden Mann-Kendallův test. Pro výpočet Mann-Kendallova testu je použit program Excel s rozšířením XLSTAT, který dokáže ze správně zadaných vstupních dat vypočítat hodnoty S, Var (S) a p-value. Pokud je ve zpracování jednotlivých měsíců nebo roků p-value menší než 0,05, znamená to, že daná oblast dat má nějaký trend. Velikost a směr tohoto trendu označuje hodnota Z, která se vypočte podle vzorce uvedeného v kapitole č. 2.3.1. Výsledky Mann-Kendallova testu jsou uvedeny v tabulce, která obsahuje vyhodnocené měsíční a roční řady, jejich hodnotu Z, p-value a v případě trendu také jeho směr (viz tab. č. 4.2).

Tab. č. 4.2: Vyhodnocení časové řady pomocí Mann-Kendallova testu (CHMI, zpracování vlastní)

Období	Z	p-value	Trend
Listopad	-0,991	0,321	žádný
Prosinec	-1,04	0,298	žádný
Leden	0,097	0,923	žádný
Únor	0	1	žádný
Březen	-0,193	0,847	žádný
Duben	-2,323	0,02	klesající
Květen	-1,427	0,153	žádný
Červen	-0,629	0,529	žádný
Červenec	-0,484	0,628	žádný
Srpen	-2,08	0,037	klesající
Září	-1,21	0,226	žádný
Říjen	1,113	0,266	žádný
Rok	-1,233	0,217	žádný

Z výsledků je patrný klesající trend v měsících dubnu a srpnu, kdy se hodnoty průtoků snížily. Tento trend je statisticky průkazný, neboť hodnoty p-value pro dané měsíce jsou menší než 0,05. Trendy časových řád průtoků vyhodnocují pomocí

Mann-Kendallová testu také Královec (2009) a Navrátilová (2018). Královec (2009) se ve své diplomové práci zaměřil na průtoky řek Opavy a Opavice za období 1962 – 2006. Zaznamenal statisticky průkazný klesající trend (p -value menší než 0,05) měsíčních průtoků v květnu až červenci a ročního průtoku u řeky Opavy a klesající trend v květnu a červnu u řeky Opavice. Navrátilová (2018) hodnotila průtoky řeky Svatavy a Načetínského potoka, ležících v Krušných horách. V období 1961-2017 byl Mann-Kendallovým testem zaznamenán statisticky průkazný klesající trend (p -value menší než 0,05) měsíčních průtoků na obou vodních tocích v dubnu až červenci a také klesající trend ročních průtoků.

5 Závěr

Bakalářská práce je rozdělená na dvě části, literární rešerši a praktickou část. V literární rešerši jsou popsány jednotlivé metody používané pro měření průtoků, včetně těch jednodušších a starších až po nejnovější, které používají moderní technologie a lze s nimi hodnotit i průtoky na velkých vodních tocích. V druhé části literární rešerše jsou uvedeny a popsány metody pro hodnocení časových řad průtoků. Praktická část popisuje vybrané povodí, změny ve využití půdy od roku 1990, klimatické charakteristiky povodí a vyhodnocuje průtoky řeky Lomnice pomocí vybraných hodnotících metod.

K vyhodnocení průtoků jsou použity statistické metody, jako jsou jednoduchá součtová čára, regresní analýza a Mann-Kendallův test. Tyto výsledky hodnocení průtoků jsou následně porovnány s dalšími výzkumy, které na stejné téma provedli Vlnas (2015), Královec (2009) a Navrátilová (2018). Z tohoto porovnání informací lze konstatovat, že průtoky vodních toků se v České republice v posledních letech snižují. V případě řeky Lomnice, která je v této bakalářské práci hodnocena, se jedná o trend snížení průtoků v dubnu a srpnu. Souvislost poklesu průtoků ve vodních tocích lze přisoudit změně intenzity a rozložení srážek, kterou v posledních letech způsobuje globální oteplování. Vliv změny využívání krajiny na průtok vodních toků nebyl shledán natolik významným, aby dokázal ovlivnit velikost průtoků stejně jako srážky.

6 Seznamy

6.1 Seznam literatury

6.1.1 Seznam „klasické“ literatury

Ahmad, I. et al. (2015). Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin. *Advances in Meteorology*. 15(2): 1–15.

Bartušek, P. (1985). *Odpadní vody v textilním průmyslu*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Bezdíček, V. (1966). *Hydrologie*. Vysoké učení technické, Brno.

Boor, B. et al. (1968). *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Cipra, T. (1986). *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Dub, O. (1969). *Hydrologie*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. 2. vydání. Routledge, New York. ISBN 978-0-203-93366-4.

Havlík, V. (2001). *Hydraulika 20: příklady*. 2. Vydání. Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-02355-9.

Holata, M. (2002). *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Editoval P. Gabriel. Academia, Praha. ISBN 80-200-0828-4.

Jandora, J. et al. (2002). *Hydraulika a hydrologie*. CERM, Brno. ISBN 8021422041.

Jenčík, J. (1998). Ultrazvukové průtokoměry. *Automatizace*, 41(5): 300–303.

Kemel, M. (2000). *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vydavatelství ČVUT, Praha. Dotisk 1. vydání. ISBN 80-01-01456-8.

Kunštátský, J. a Patočka, C. (1971). *Základy hydrauliky a hydrologie pro inženýrské konstrukce a dopravní stavby*. 2. vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Kvítek, T. (2013). Nedávné povodně, současná sucha a retence vody. *Vodní hospodářství*, 63(12): 423–424.

Kvítek, T. (2017). *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce: význam retence vody na zemědělském půdním fondu pro jakost vody a současně i průvodce vodním režimem krystalinika*. Povodí Vltavy, státní podnik, Praha. ISBN 978-80-270-2488-9.

-
- Královec, V. (2009). *Změny srážkoodtokových poměrů v povodí horní Opavy*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Fakulta přírodovědecká.
- Kříž, V. et al. (1979). *Hydrometeorologický ústav Praha*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Mattas, D. (2014). *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha. ISBN 978-80-87402-27-6.
- Navrátilová, D. (2018). *Trendy hydroklimatických faktorů ve vybraných povodí Krušných hor*. Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, Fakulta přírodovědecká.
- Netopil, R. (1981). *Fyzická geografie I: Hydrologie, Limnologie, Oceánografie*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha.
- Pavelková Chmelová, R. a Frajer, J. (2013). *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc. ISBN 978-80-244-3843-6.
- Patočka, C. (1956). *Základy hydrologie pro zemědělce a lesníky*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Pelikán, V. et al. (1988). *Hydrogeologická měření*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Pytl, V. (2004). *Průručka pro provozovatele čistírny odpadních vod*. Medim, Líbeznice u Prahy. ISBN 80-239-2528-8.
- Reiterová, E. (2003). *Základy psychometrie*. Univerzita Palackého, Olomouc. ISBN 80-244-0717-5.
- Roub, R. a Pech, P. (2003). *Hydraulika: příklady*. Credit, Praha. ISBN 80-213-1059-6.
- Siegel, Seth M. (2016). *Budiž voda: izraelská inspirace pro svět ohrožený nedostatkem vody*. Přeložila H. Škapová. Aligier, Praha. ISBN 978-80-906420-0-3.
- Starý, M. (2005). *Hydrologie (MODUL 01, 02): skripta*. VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno.
- Šlezinger, M. (2006). *Říční typy: úvod do problematiky úprav toků*. CERM, Brno. ISBN 80-7204-481-8.
- Trizna, M. (2004). *Klimageografía a hydrogeografía*. Geo-grafika, Bratislava. ISBN 8096814672.
- Váša, J. et al. (1982). *Význam hydrologie pro rozvoj národního hospodářství*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Vlnas, R. (2015). Pozorované změny složek hydrologické bilance z hlediska využitelných vodních zdrojů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 57(4–5): 27–32.

Žalud, Z. et al. (2019). *Zemědělské sucho v České republice - vývoj, dopady a adaptace*. Agrární komora České republiky, Praha. ISBN 978-80-88351-02-3.

6.1.2 Seznam legislativy

ČSN ISO 9826 (25 9342). (1994). *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech: Parshallovy žlaby a žlaby typu Saniiri*. Praha: Český normalizační institut.

6.1.3 Seznam internetových zdrojů

Pars-aqua.cz (2009). *Odborný článek o měření průtoků*. [online] [cit. 30. 12. 2020]. Dostupné z: www.pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html

6.1.4 Seznam zdrojů

Podnebí Československé socialistické republiky. Tabulky. (1961) HMÚ, Praha.
<https://www.cuzk.cz/>
<https://www.chmi.cz/>

6.2 Seznam obrázků

Obrázek č. 2.1: Automaticky sklopné nádoby	10
Bumerl, M. (2003). <i>Hydrologie</i> . Veselí nad Lužnicí	
Obrázek č. 2.2: Thomsonův přeliv	11
https://www.fiedler.company/sites/default/files/produkt/merne_prelivy-500.png	
Obrázek č. 2.3: Cippolettiho přeliv	13
https://www.fiedler.company/sites/default/files/produkt/merne_prelivy_cipoletti-500.png	
Obrázek č. 2.4: Parshallův žlab.....	14
https://pars-aqua.cz/img/article/parshalluv_zlab.jpg	
Obrázek č. 2.5: Podélný řez Parshallovým žlabem.....	14
https://www.fiedler.company/sites/default/files/produkt/blokove_schema_vzdouvaci_objekt-500.png	
Obrázek č. 2.6: Venturiho žlab	15
https://pars-aqua.cz/img/article/venturi_zlab.jpg	
Obrázek č. 2.7: Podélný řez Venturiho žlabu	15
Bartušek, P. (1985). <i>Odpadní vody v textilním průmyslu</i> . Státní nakladatelství technické literatury, Praha.	

Obrázek č. 2.8: Žlab Saniiri	16
ČSN ISO 9826 (25 9342). (1994). <i>Měření průtoku kapalin v otevřených korytech: Parshallovy žlaby a žlaby typu Saniiri</i> . Praha: Český normalizační institut.	
Obrázek č. 2.9: Hydrometrická vrtule.....	17
https://cksvv.vuv.cz/files/images/cksvv/hydrometricke_vrtule_seba_03.jpg	
Obrázek č. 2.10: Ultrazvukové měření pomocí Dopplerova jevu.....	18
https://www.researchgate.net/profile/David_Mueller9/publication/284587353/figure/fig1/AS:643152750854144@1530350973294/Illustration-of-a-boat-mounted-acoustic-Doppler-current-profiler-ADCP-measuring_W640.jpg	
Obrázek č. 2.11: Ultrazvukové měření průtoku	19
https://pars-aqua.cz/img/article/transmise.jpg	
Obrázek č. 2.12: Vodočetná lať	20
https://d34-a.sdn.cz/d_34/c_img_H_C/VQJQJ9.jpeg?fl=res,667,500,1	
Obrázek č. 2.13: Konsumpční křivka.....	20
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Rating_curve-cz.PNG	
Obrázek č. 2.14: Graf hustoty pravděpodobnosti.....	22
Starý M. (2005). <i>Hydrologie (MODUL 01, 02)</i> : skripta. VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno.	
Obrázek č. 2.15: Graf empirické čáry pravděpodobnosti překročení	24
https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pics/obr09-11.png	
Obrázek č. 3.1: Povodí řeky Lomnice.....	28
CHMI, zpracování vlastní	
Obrázek č. 4.1: Land use povodí Lomnice v roce 1990.....	30
CENIA, zpracování vlastní	
Obrázek č. 4.2: Land use povodí Lomnice v roce 2021.....	31
LPIS, zpracování vlastní	
6.3 Seznam grafů	
Graf č. 4.1: Roční úhrn sněhových srážek na povodí	32
CHMI, zpracování vlastní	
Graf č. 4.2: Odchylka dešťových srážek od průměru	32
CHMI, zpracování vlastní	
Graf č. 4.3: Jednoduchá součtová čára.....	34
CHMI, zpracování vlastní	

Graf č. 4.4: Graf regresní přímky36

CHMI, zpracování vlastní

6.4 Seznam tabulek

Tabulka č. 4.1: Průměrné hodnoty měsíční a ročních průtoků33

CHMI, zpracování vlastní

Tabulka č. 4.2: Vyhodnocení časové řady pomocí Mann-Kendallova testu.....37

CHMI, zpracování vlastní