



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

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

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra krajinného managementu

Diplomová práce

Analýza časových řad průtoků ve vybrané oblasti

Autor práce: Bc. Tomáš Hoch

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

České Budějovice

2023

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

Diplomová práce se zabývá způsobem používaným pro měření průtoků a jejich následnému vyhodnocení. V literární rešerši jsou uvedeny a popsány základní hydrologické pojmy týkající se povodí a odtoku. V další kapitole jsou popsány způsoby, které se používají k měření a stanovení průtoku vodních toků. V poslední části literární rešerše jsou uvedeny metody pro hodnocení časových řad, pomocí kterých se určují vlastnosti, trendy a další statistiky týkající se povodí a průtoku.

Následuje praktická část, ve které jsou popsána zkoumaná povodí. Pro každé povodí jsou zpracovány údaje o průtocích a srážkách, které jsou v další části vyhodnoceny pomocí vybraných metod. Výsledky těchto analýz jsou následně popsány, porovnány s dalšími výzkumy a jsou vysvětleny možné příčiny změn, které zde nastaly.

Klíčová slova: průtok, úhrn srážek, hydrologická časová řada, podvojná součtová čára, Mže, Berounka

Abstract

This diploma thesis deals with the methods used for flow measurement and their subsequent evaluation. The literature research describes basic hydrological concepts related to watersheds and runoff. The next chapter describes the methods used to measure and determine the flow of water flow rates. In the last part of the literature research, methods for evaluating time series are presented which are used to determine characteristics trends and other statistics related to watershed and flow.

This is followed by a practical part in which the investigated watersheds are described. Data on flows and precipitation are processed for each basin which are evaluated in the next section using selected methods. The results of these analyzes are subsequently described, compared with other researches and the possible causes of the changes that occurred are explained.

Keywords: flow, precipitation depth, water flow time series, double mass curve, Mže, Berounka

Poděkování

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

Obsah

Úvod.....	7
1 Literární rešerše	8
1.1 Hydrologie.....	8
1.1.1 Povodí	8
1.1.2 Srážky	10
1.1.3 Odtok	11
1.1.4 Srážko-odtokový proces.....	13
1.1.5 Přírodní faktory ovlivňující odtok	14
1.1.6 Antropogenní faktory ovlivňující odtok	15
1.2 Způsoby měření průtoků vody	16
1.2.1 Měření průtoků do nádoby	16
1.2.2 Měření průtoků pomocí přelivů	17
1.2.3 Měření průtoků pomocí měrných žlabů.....	19
1.2.4 Měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule	22
1.2.5 Měření průtoků pomocí indikátorových metod.....	23
1.2.6 Měření průtoků pomocí ultrazvuku	23
1.2.7 Měření průtoků pomocí konsumpční křivky	24
1.3 Metody hodnocení časových řad průtoků	26
1.3.1 Popisné statistiky	26
1.3.2 Jednoduchá a podvojná součtová čára	28
1.3.3 Regresní analýza.....	28
1.3.4 Mann-Kendallův test.....	28
1.3.5 Empirická čára pravděpodobnosti překročení.....	28
1.3.6 Autokorelační funkce.....	29
1.3.7 Spektrální hustota	29
1.3.8 Dekompozice hydrologických řad.....	30

1.3.9	Metoda klouzavých průměrů.....	31
2	Metodika.....	32
2.1	Cíl práce.....	32
2.2	Použité metody a software	32
2.3	Změna land use	34
2.4	Popis jednotlivých povodí.....	35
2.4.1	Povodí Hamerského potoka	35
2.4.2	Povodí Mže	36
2.4.3	Povodí Berounky	38
2.5	Použitá data	41
3	Výsledky a diskuse.....	43
3.1	Změna land use.....	43
3.2	Podvojná součtová čára.....	45
3.2.1	Koeficient odtoku	49
3.3	Regresní analýza.....	52
3.4	Mann-Kendalův test.....	55
3.5	T-test pro nezávislé výběry	57
	Závěr	58
	Seznam použité literatury.....	59
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam tabulek.....	66

Úvod

Základními zdroji přírody jsou voda, půda a ovzduší, které zajišťují podmínky pro život. Voda je součástí živé i neživé přírody a vyskytuje se jako stojatá či tekoucí povrchová a podzemní voda. Největší význam má povrchová voda, která je nejvíce využívána živými organismy včetně člověka, který ji využívá nejen jako zdroj pitné vody, ale také pro energetické, zemědělské a průmyslové využití (Jůva et al., 1984).

Vodní toky se na Zemi jsou výsledkem dlouhodobých procesů, během kterých se jejich povodí a koryta měnily například v důsledku sopečné činnosti, pohybu litosférických desek, anebo působením ledovce. Těmito procesy tak vznikala jednotlivá povodí a vodní toky, které známe v současnosti. Některá povodí a vodní toky zůstaly nedotčené, avšak u některých došlo ke změnám a úpravám v důsledku lidské činnosti. Ty nejčastěji souvisely s úpravou v důsledku zemědělské činnosti nebo energetického využití vodních toků. Podstatnými zásahy do vodních toků byly a také jsou kvůli těžební činnosti, kde se mění hranice povodí a někde dokonce dochází i ke změně nebo přeložení jednotlivých částí vodního toku (Růžička, 1962; Kender, 2000).

V současné době dochází v České republice v důsledku klimatické změny k častým výkyvům teplot a srážek. Tyto výkyvy mají vliv nejen na zemědělské hospodaření, ale také na celkový odtok a zásoby půdní vody. Těmto změnám se snažíme přizpůsobovat a vytvářejí se opatření, která pomáhají zadržovat vodu v krajině a podporují tak její infiltraci do zásob podzemní vody. Dále dochází ke změnám, které pomáhají lépe vodu využívat a co nejefektivněji s ní hospodařit. Jsou také revitalizovány v minulosti narovnané vodní toky, aby nedocházelo k rychlému odtoku vody z území, ale co nejvíce jí zůstávalo v daném povodí (Žalud et al. 2019).

1 Literární rešerše

1.1 Hydrologie

1.1.1 Povodí

Povodí označuje území, ze kterého je odváděna veškerá voda sítí malých i velkých vodotečí k danému uzávěrovému profilu. Jednotlivá povodí jsou od sebe oddělena rozvodnicí, která se dělí na orografickou a hydrogeologickou. Orografická rozvodnice vymezuje povodí po nejvyšších bodech v území a značí tedy povodí povrchové vody. Naopak hydrogeologická rozvodnice ohraničuje povodí podzemní vody a hranice povodí se stanovuje podle geologického složení půd. Tato rozvodnice se často určuje v krasových oblastech (Sommer, 1985).

Tvar povodí

Důležitou charakteristikou povodí je jeho tvar, který se většinou blíží tvaru protáhlého nepravidelného listu, jež se směrem k uzávěrovému profilu zužuje. Tvar vyjadřuje Kvítek (2006) součinitelem tvaru povodí, který se vypočítá podle vzorců:

$$\alpha = \frac{B}{L_u}$$

$$B = \frac{F}{L_u}$$

kde:

α – součinitel tvaru povodí

B – střední šířka tvaru povodí

L_u – délka údolnice

F – plocha povodí

V závislosti na zjištěném součiniteli se určí výsledný tvar povodí. Pokud je $\alpha < 0,24$, jedná se o povodí protáhlé, když $\alpha = 0,24 - 0,26$, povodí je přechodného tvaru a pokud $\alpha > 0,26$ jedná se o povodí vějířovité.

Tvar povodí značně ovlivňuje způsob odtoku a s ním spojenou dobu a velikost kulminace průtoku při extrémních srážkových situacích. U vějířovitých povodí dochází k rychlému odtoku vody, která se může sejít v blízkosti uzávěrového profilu ve stejnou dobu a vytvořit tak rozsáhlou povodeň. Avšak doba kulminace vody je u těchto povodí krátká a hladina vody následně rychle klesá. Naproti tomu u protáhlých povodí voda nepřitéká v jeden okamžik, ale postupně. Proto zde dochází k nižší výšce povodňové vlny, ale s delší dobou kulminace, protože trvá určitý čas,

než k uzavěrovému profilu doteče i voda z nejbližších částí povodí (Soukup a Hrádek, 1999).

U povodí lze také kromě celkového tvaru, zjišťovat jeho symetrii, která udává zastoupení pravostranné a levostranné plochy povodí. Sommer (1985) uvádí výpočet koeficientu symetrie povodí podle vzorce:

$$\varphi = \frac{F - F_p}{F - F_l}$$

Kde:

F je celková plocha povodí

F_p značí pravostrannou plochu povodí

F_l značí levostrannou plochu povodí

Pokud je výsledný koeficient v rozmezí od 0 do 1, jedná se o povodí s převahou plochy na pravém břehu. Velmi výjimečně může být koeficient 1, který by značil dokonale symetrické povodí se stejnou plochou na pravé a levé straně. V případě koeficientu většího než 1, má povodí větší levostrannou plochu.

Hustota říční sítě

Hustota říční sítě se používá pro vyjádření délky vodních toků přepočtené na plochu povodí. Následně se tento údaj používá pro přibližné určení průběhu extrémního odtoku. Povodí s malou hustotou vodních toků se vyznačuje tím, že voda kvůli velké vzdálenosti k nejbližšímu korytu toku odtéká po povrchu delší dobu, a tím se také prodlužuje doba, po kterou se může voda infiltrovat do půdy. Nedochází zde tedy k žádnému rozsáhlému přímému odtoku, voda se postupně infiltruje a povodňová vlna není tak velká. Naproti tomu hustá síť vodních toků značí krátkou dobu povrchového odtoku, a tedy i možné infiltrace. Poté se voda ocitne v korytě nejbližšího vodního toku, odkud rychle odtéká do hlavní vodoteče. Zde společně s další přitékající vodou vytvoří velkou povodňovou vlnu, dojde k rychlé kulminaci, avšak s krátkou dobou trvání, protože vysoká rychlost odtoku z celého povodí způsobí následně opět prudký pokles hladiny (ČHMÚ, 2010).

Svažitost

Na rychlost odtékající srážkové vody má značný vliv svažitost povodí. Se zvyšujícím se sklonem roste také rychlost odtoku, což negativně působí na množství infiltrované vody. Na rovinatém území mají srážky mnoho času k infiltraci a přechází tedy často do podpovrchové a následně do podzemní vody. Naopak na svažitých územích

většina srážek okamžitě tvoří povrchový odtok, který se dostane do nejbližší vodoteče a jen velmi malá část stihne infiltrovat (ČHMÚ, 2010).

Výšková charakteristika povodí

Nadmořská výška povodí ovlivňuje složení a vlastnosti travních a lesních porostů a tím také odtok z území. Lesní porosty mají odlišně vlastnosti ve vyšší a nižších výškách. Například u jehličnatých lesů dochází v nižších nadmořských výškách k vysychání vrstvy tlejícího jehličí, která následně není schopna rychle propouštět vodu do půdy a zvyšuje se tak povrchový odtok. Naopak v horských oblastech, které jsou jejich přirozeným stanovištěm, je tato vrstva stále vlhká, rychleji se rozpadá a tvoří tak kyselou humusovou vrstvu, která snadno propouští vodu do půdy (Sommer, 1985).

Množství srážek velmi úzce souvisí s nadmořskou výškou. Povodí ve vyšších polohách a horských oblastech mají vyšší srážkové úhrny než povodí v nížinách, které mnohdy dosahují jenom poloviny množství srážek oproti povodím v horách. Větší množství srážek a také větší svažitost terénu u horských povodí způsobuje, že mají větší předpoklad pro vyšší hodnoty odtoku vody z povodí. U nížinatých povodí jsou naopak nižší srážkové úhrny a svažitost, tudíž je zde předpoklad pro nižší odtok a nižší sklon poskytne více času infiltrovat vodu do půdy (Němec, 1965; Blažek et al., 2006).

Dalším vlivným činitelem je výpar. Velikost výparu vody je závislá na teplotě okolí a to tak, že s rostoucí teplotou, roste také množství vypařené vody z krajiny. Sommer (1985) uvádí, že s nadmořskou výškou souvisí pojem vertikální teplotní gradient, který udává změnu teploty se změnou nadmořské výšky. V podnebí České republiky činí vertikální teplotní gradient 0,65 °C na 100 m výšky. Teplotní rozdíl mezi nejnižším bodem, oblast Hřenska, přibližně 200 m. n. m., a nejvyšším, tedy Sněžkou přibližně 1600 m. n. m., je 9,1 °C. Tento teplotní rozdíl je však pouze přibližný a nezohledňuje další faktory ovlivňující teplotu, jako jsou například vítr nebo oblačnost.

1.1.2 Srážky

Srážky označují částice vody, které se vytvářejí v atmosféře a následně dopadají na zemský povrch, anebo přímo vznikají kondenzací vodní páry v blízkosti zemského povrchu. Srážky se vyskytují ve dvou skupenstvích, a to v pevném a kapalném. Pevné skupenství označuje srážky sněhové a kroupy, kapalné označuje déšť nebo mrholení, tento druh srážek v České republice převládá, a pokud dojde k prolínání

obou skupenství, jedná se o přechodný typ srážek, kterým je déšť se sněhem nebo kroupami. Kapalné srážky se dále dělí podle velikosti padající kapky vody na déšť, pokud jsou kapky větší než 0,5mm, a mrholení, pokud jsou kapky menší než 0,5mm (Žalud, 2015).

Srážky se rozdělují podle místa vzniku na vertikální (atmosférické) a horizontální. Vertikální srážky vznikají v oblasti atmosféry kondenzací vodní páry na jednotlivých kondenzačních jádrech, které poté vytvářejí déšť, mrholení, sníh nebo kroupy. Horizontální srážky označují druh srážek, který vzniká v blízkosti zemského povrchu. V případě že dojde k ochlazení přízemního vzduchu pod rosný bod, vznikají srážky, kterými jsou rosa a mlha, a pokud teplota vzduchu nebo povrchu klesne pod bod mrazu, vytváří se jinovatka, námraza a ledovka. (Šilar, 1996; Kopáček a Bednář, 2005).

Měření srážek se provádí pomocí ombrometru, popřípadě ombrografu, který zaznamenává množství srážek v průběhu času. U srážek je možné vyhodnocovat jejich množství, které značí celkovou výšku srážek za určitou dobu nebo srážkovou událost a udává se obvykle v mm. Při měření ombrografem, se zaznamená také délka trvání srážkové události, ze které lze následně stanovit intenzitu srážek, udávající množství srážek za určitý čas, nejčastěji se uvádí v mm/minutu nebo v mm/hodinu (Šilar, 1996).

1.1.3 Odtok

Odtok udává množství vody, oteklé z daného povodí korytem vodního toku za určité sledované období. Pro stanovení odtoku, je potřeba nejprve zjistit průtok vody v korytě vodního toku. Kemel (2000) tento pojem definuje jako množství vody, protékající daným průtočným profilem za 1 sekundu. Značí se velkým písmenem Q a je udáván nejčastěji v m³/s nebo v l/s, v závislosti na velikosti vodního toku. Ze zjištěného průtoku lze následně stanovit odtok, udávající objem vody oteklý z povodí průtočným profilem za danou dobu, například za jeden den nebo rok a jeho hodnoty dosahují obvykle tisíců nebo milionů m³.

Velikost odtoku vody z určitého zkoumaného povodí se určuje specifickým odtokem. Jedná se o průměrný odtok vody z daného povodí za určitý čas, nejčastěji za 1 sekundu, v tomto případě je obvykle vyjádřen v l.s⁻¹km⁻² nebo m³.s⁻¹.km⁻². Je možné stanovit specifický průtok i pro delší časový úsek, jako je jeden den, měsíc nebo rok (Kemel, 2000).

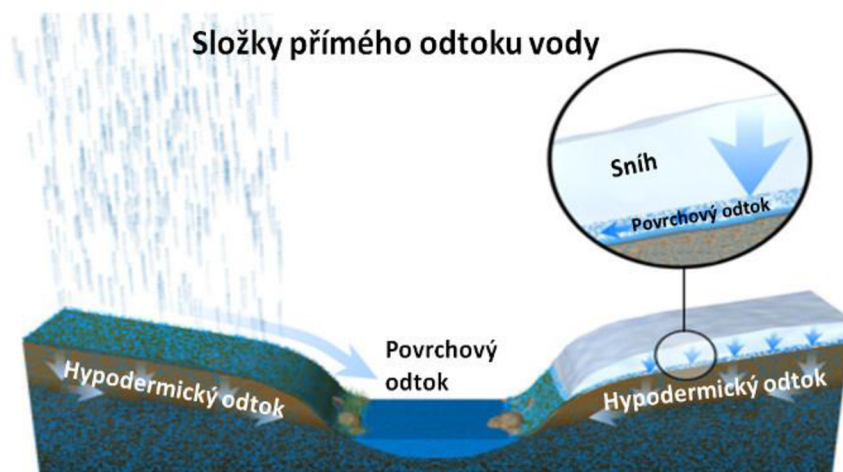
Dělení odtoku, výška odtoku

Celkový odtok z povodí je složen ze tří základních odtoků, kterými jsou povrchový, podpovrchový (hypodermický) a podzemní odtok (Kříž, 1983). Tyto jednotlivé odtoky jsou blíže popsány níže.

Povrchový odtok označuje vodu, která odtéká po povrchu povodí do sběrného vodního toku. K této situaci dochází, když je intenzita srážek vyšší než infiltrační schopnost půdy. Povrchový odtok je tedy tvořen vodou, která nestihá infiltrovat do půdy, ale odtéká ve směru sklonu zemského povrchu (Davie a Quinn, 2019). Na rovinném terénu je rychlost povrchového odtoku nižší a voda má tedy delší čas k infiltraci do půdy. Retenční schopnost takovéto krajiny je vyšší oproti terénu kopcovitému a svažitému, avšak pouze do doby, než dojde k nasycení půdního profilu. Poté už nedochází k infiltraci do půdy a veškerá voda odtéká po povrchu (Čamrová, 2007). V případě přívalových dešťů nastává větší povrchový odtok, při kterém mohou převážně na malých horských vodních tocích vznikat lokální povodně, neboť většina vody odtéká po povrchu a jen velmi málo jí stihne infiltrovat (Tarboton, 2003).

Podpovrchový neboli hypodermický odtok označuje gravitační vodu nacházející se ve svrchní vrstvě půdy, která se částečně dál infiltruje a část odtéká do sběrné vodoteče. Tato voda se nachází v hloubce několika centimetrů až decimetrů pod povrchem a odtéká postupně do vodoteče i několik dní od poslední srážkové události (Kříž, 1983).

Povrchový a podpovrchový odtok dohromady tvoří přímý odtok (viz obr. 1.1), který udává množství vody, které se nejrychleji dostává do vodoteče. Přímý odtok se také využívá při zpracování a vyhodnocování průtoků, protože určení odtoku pouze povrchového a pouze podpovrchového je velmi náročné a zdlouhavé (Kříž, 1983).

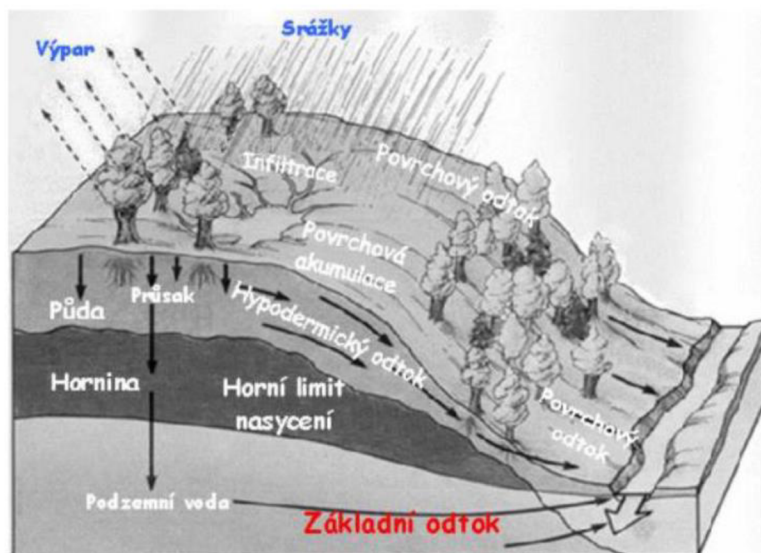


Obrázek 1.1: Složky přímého odtoku vody (chmi.cz, 2023)

Podzemní odtok označuje vodu, odtékající pod zemským povrchem z plně nasyceného půdního profilu, který tvoří zásobu podzemní vody. Tato zásoba vzniká dlouhodobou infiltrací vody do půdy, která ale také postupně pomalu odtéká, a vytváří tak podzemní odtok. Během srážkově vydatných období, tvoří podzemní odtok jen velmi malou část celkového odtoku, který ovlivňuje průtok vodních toků, protože většina vody pochází z přímého odtoku. Naproti tomu v období, kdy jsou srážkové úhrny malé nebo se vyskytnou déletrvající sucha, jsou vodní toky napájeny téměř výhradně pouze podzemním odtokem (Smakhtin, 2001).

1.1.4 Srážko-odtokový proces

Srážko-odtokový proces lze definovat jako vzájemně propojený vztah odtoku a srážek. Vzniklé srážky se následně vypařují, jsou zachyceny na povrchu rostlin (intercepce), vsakují se do půdy a v případě vydatných srážek také odtékají po povrchu. Srážko-odtokový proces se stanovuje pro dané povodí, a to buď dlouhodobě, nebo pro jednotlivé srážkové události. U každého povodí je však tento proces odlišný, neboť se odlišují klimatickými, geologickými a socioekonomickými poměry, které mají zásadní vliv na průběhu odtoku. Jednotlivé složky srážko-odtokového procesu jsou blíže popsány v předchozích kapitolách a jednoduché schéma průběhu tohoto procesu je znázorněno na obrázku 1.2 (Starý, 2005).



Obrázek 1.2: Znáornění srážko-odtokového procesu (Starý, 2005)

1.1.5 Přírodní faktory ovlivňující odtok

Odtok vody z povodí je ovlivňován kromě vlivu člověka také některými přírodními faktory, kterými jsou především pedologické a geologické vlivy.

Pedologické vlivy

Z pedologického hlediska velikost odtoku ovlivňují fyzikální vlastnosti půd, mezi které patří zrnitost půdy, její struktura, pórovitost a obsah humusu. Vlastnosti půd se také mění v důsledku působení vnějších činitelů, kterými jsou například míra zhutnění půdy, půdní vlhkost nebo výška podzemní vody. Na množství odtoké vody má vliv také kořenový systém rostlin, který svým působením ovlivňuje stav půdy a zvyšuje množství infiltrované vody (Čamrová, 2007). Informace o vlastnostech a infiltrační schopnosti půd v České republice, je možné získat z mapy bonitovaných půdně ekologických jednotek (Soukup a Hrádek, 1999).

Geologické vlivy

Odtok vody z povodí závisí také na horninovém složení, které svojí propustností, výrazně ovlivňuje množství infiltrované vody. Některé horniny jsou velmi málo propustné a odtok z povodí tak zvyšují, zatímco jiné jsou hodně propustné a voda tak ve větší míře infiltruje do půdy. Mezi velmi málo propustné a nepropustné patří krystalické druhy hornin, jejichž nejznámějším zástupcem je žula. Naopak vysoké propustnosti dosahují písčité půdy, šterkovité půdy a hluboce zvětralé horniny (Ruda, 2014).

1.1.6 Antropogenní faktory ovlivňující odtok

Způsob využití území

Množství vody, která odtéká povrchovým odtokem do vodního toku, je ovlivněno způsobem využití krajiny v daném povodí. Nejvyšší schopnost zadržovat v krajině vodu a srážky mají lesní porosty, které jen pomocí intercepce, tedy povrchem rostlin, dokážou zachytit značné množství srážek, především nízkých srážkových úhrnů. Dalším významným prvkem v krajině jsou trvalé travní porosty, které rovněž jako lesy jsou schopny zachytit část srážek intercepce na listech. Dále také snižují rychlost povrchového odtoku, díky čemuž je většina vody schopna zasáknout do půdy. Naopak horší schopnost zadržování vody má orná půda. Prvním důvodem je nižší rostlinný pokryv, který nedokáže zachytit tolik srážek. Dalším faktorem je způsob obdělávání, neboť při pěstování plodin kolmo na vrstevnice se zrychluje povrchový odtok a posledním je horší schopnost infiltrace vody z důvodu utužení půdy při obdělávání těžkou zemědělskou technikou. Nejvíce zvyšují povrchový odtok antropogenně upravené, betonové, dlážděné a asfaltové plochy, u kterých se voda jen velmi málo, anebo vůbec nevsakuje, ale odtéká po povrchu (Kvítek, 2013).

Vodní nádrže (Retence a akumulace vody v krajině)

Vodní nádrže plní ve vodním hospodářství hned několik funkcí, slouží jako zásobárny pitné vody, jsou využívány pro výrobu energie, pro zavlažování v zemědělství, pro splavňování dopravně významných částí toku, pro chov ryb a v neposlední řadě také k rekreaci. Dále také jsou schopny výrazně ovlivnit průtok vodních toků, a proto jsou využívány k akumulaci a retenci vody (Tlapák, 1992).

Akumulace vody ve vodní nádrži označuje její dlouhodobé zadržení, které způsobí zvýšení hladiny vodního toku a snížení průtokové rychlosti směrem proti proudu. Při takovémto ovlivnění ovšem dochází k usazování sedimentů a splavenin v prostoru vodní nádrže, čímž dochází k postupnému snižování prostoru pro zadržení vody. Po určitém čase je tedy nezbytné takovouto nádrž kompletně vypustit a vyčistit, aby opět dosahovala původně plánované akumulací kapacity (Růžička, 1962).

Vodní nádrže mají také retenční funkci, která slouží ke krátkodobému zadržení vody. Pomocí zdymadel nebo stavidel regulujících výšku hladiny ve vodní nádrži, je možné dočasně vytvořit retenční prostor, který dokáže například zachytit část povodňové vlny a zpomalit a snížit její účinnost. Tato regulace na vodních tocích je často používána před očekávanými vydatnými srážkami, kdy se vodní stavy vodních

nádrží sníží, aby posléze mohli zadržet co nejvíce vody. Další využití této funkce je také v období sucha, kdy se retenční zásoba vody ve vodní nádrži pomalu vypouští, aby se zajistil alespoň minimální zůstatkový průtok vodního toku, nezbytný pro přežití vodních organismů (Růžička, 1962).

1.2 Způsoby měření průtoků vody

Dub et. al. (1969) člení způsoby měření průtoků vody na:

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

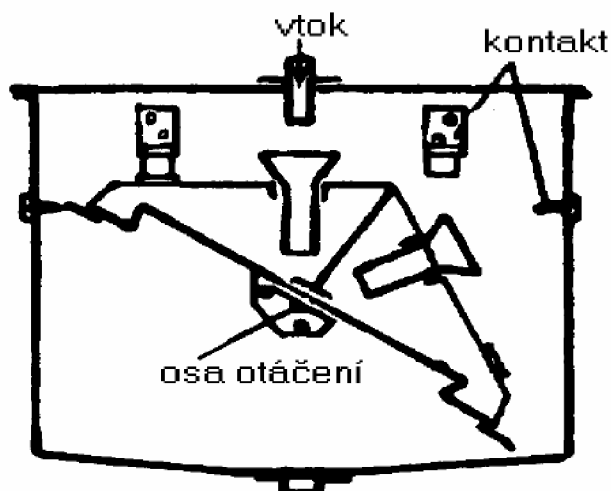
V současnosti lze měřit průtok vody také pomocí ultrazvuku, který je nejnovějším a velmi přesným způsobem pro měření průtoků (Pavelková Chmelová a Frajer, 2013).

1.2.1 Měření průtoků do nádoby

Prvním popisovaným způsobem je měření do nádoby, které je snadnou a rychlou metodou, pomocí které lze změřit průtok v daném profilu vodního toku. Pro měření se používá nádoba, nejčastěji tvaru kvádrů, u které známe její objem. Samotné měření probíhá tak, že se svede voda z vodního toku do jednoho místa, odkud následně teče do měrné nádoby. Měří se čas, který je potřebný k naplnění nádoby a poté se změřené hodnoty dosadí do vzorce $Q = \frac{V}{t}$, kde V značí objem nádoby a t je čas jejího plnění, čímž se vypočítá průtok Q v daném místě vodního toku. Pro získání co nejpřesnější hodnoty průtoků se měření opakuje alespoň třikrát a poté se zjištěné hodnoty aritmeticky zprůměrují. Tento způsob měření je jednoduchý, přesný, nevyžaduje žádné speciální vybavení, ale jeho využití je limitováno na drobné vodní toky a pouze na místa, kde je možné vytvořit přepad, nezbytný pro měření (Jandora et. al., 2002; Váša et. al., 1982).

Pokud by se měřil průtok za delší časový úsek, popisuje Kemel (2000) způsob použití automaticky sklopných nádob (viz obr. 1.3). Jedná se o přístroj, skládající se ze dvou nádob trojúhelníkového průřezu, které jsou spolu spojené a naklápí se na stejné ose otáčení. Jakmile se naplní jedna nádoba, překlápí se a začne se naplňovat druhá. Jednotlivá překlopení jsou zapisována na papír umístěný na válci otáčeném hodinovým mechanismem, čímž je znám počet překlopení za čas. Poté už se známý

objem nádob vynásobí počtem překlopení a zjistí se tak celkový průtok za měřený čas, ze kterého se po následné matematické úpravě stanoví průtok vody za sekundu.



Obrázek 1.3: Automaticky sklopné nádoby (Bumerl, 2003)

1.2.2 Měření průtoků pomocí přelivů

Další způsob, kterým se měří průtok, je měření pomocí přelivů. Pro samotné měření je nutné nejprve přehradit vodní tok, čímž dojde k vytvoření jezu nebo hráze, která zvýší hladinu vody a následně začne přes tento objekt přetékat. Přelivem se označuje místo, ve kterém voda přetéká přes vytvořenou překážku, v tom případě jez nebo hráz (Boor et al., 1968).

Pelikán et al. (1988) popisuje rozdělení přelivů podle tvaru a tloušťky přelivu na přelivy ostrohranné, přelivy jezové, přelivy se širokou korunou a přelivy zvláštní. K měření na menších přírodních tocích jsou nejčastěji používány ostrohranné přelivy, které jsou blíže popsány v následující části diplomové práce. Ostrohranné přelivy jsou charakterizovány tloušťkou přelivné stěny, která je menší než $0,67h$, kde h vyjadřuje výšku přetékané vody od přelivu. Ostrohranné přelivy jsou podle tvaru rozděleny na obdélníkové (Bazinův a Ponceletův), trojúhelníkové (například Thomsonův), lichoběžníkové (Cippolettiho) a kruhové.

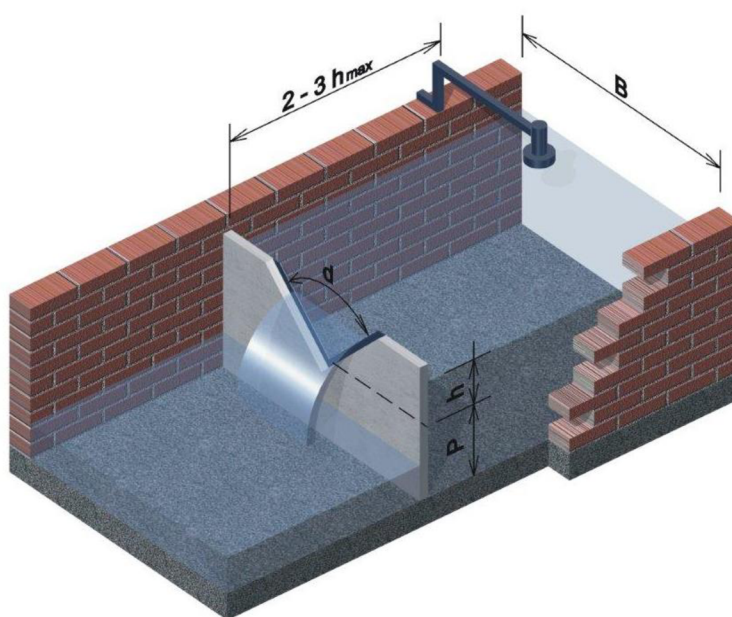
Trojúhelníkový přeliv

Pro měření i velmi malých průtoků se používá přeliv, který má rovnoramenný trojúhelníkový výřez, s vrcholovým úhlem v rozpětí od 20° do 120° (viz obr. 1.4). Avšak jeho nevýhodou je, že se snadno zanáší nečistotami a splaveninami jako jsou například listy nebo větve. Pro zjištění průtoků je nutné změřit výšku přepadající vody, která se měří před přelivem ve vzdálenosti odpovídající zhruba trojnásobku

přepadající vody. Pro získání co nejpřesnějšího výsledku je vhodné výšku měřit pomocí elektronického přístroje (Boor et. al., 1968).

V praxi se nejvíce využívá Thomsonův přeliv, který má vrcholový úhel 90° . Průtok daného vodního toku se poté zjistí dosazením do vzorce: $Q = 1,4h^{2,5}$, kde h značí výšku přepadající vody (Šlezinger, 2006).

V případě, že se pro měření použije přeliv s vrcholovým úhlem jiným než 90° , tedy mezi 20° a 120° , vypočítá se průtok pomocí Graveho vzorce $Q = 1,331(\tan \frac{\alpha}{2})^{0,996} h^{2,47}$, kde α značí vrcholový úhel a h výšku přepadající vody (Boor et al., 1968).



Obrázek 1.4: Thomsonův přeliv (pars-aqua.cz, 2022)

Obdélníkový přeliv

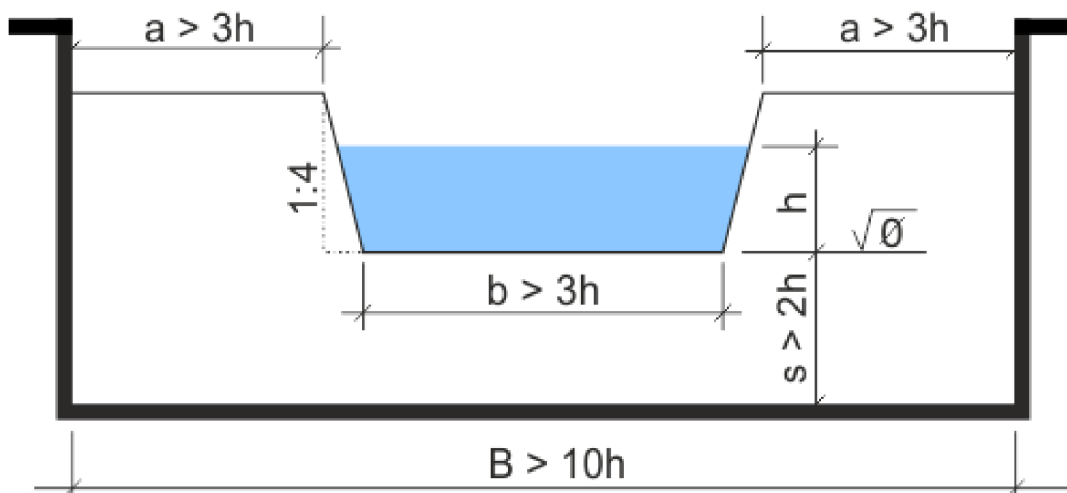
Jedním z obdélníkových přelivů je Bazinův přeliv, jehož přelivová hrana má stejnou šířku, jako vodní tok. Aby byla zajištěna správnost a přesnost měření, je zapotřebí zajistit totožný atmosférický tlak pod přepadovým paprskem, který se zajistí například pomocí trubky vyvedené pod přepadový paprsek (Roub a Pech, 2003).

Průtok u tohoto přelivu se dle Havlíka (2001) vypočítá pomocí rovnice $Q = mb\sqrt{2gh}^{3/2}$, kde m je součinitel přepadu, b označuje šířku přelivu v metrech, g je gravitační zrychlení a h je výška přepadové vody.

Velmi podobný Bazinovu přelivu je Ponceletův přeliv, který se však liší tím, že šířka přelivu je užší než koryto vodního toku. Pro výpočet průtoku se používá stejný vzorec jako u Bazinova přelivu (Boor et al., 1968).

Cippolettiho přeliv

Dalším zástupcem přelivů je Cippolettiho přeliv, který má lichoběžníkový tvar (viz obr. 1.5) se sklonem bočních stran v poměru 1:4. U tohoto přelivu je potřeba dodržet konstrukční požadavek, že šířka přelivu je minimálně třikrát větší než přepadová výška. Průtok se počítá podle vzorce $Q = 1,86bh^{1,5}$, kde b označuje šířku přelivu (Šlezinger, 2006).



Obrázek 1.5: Cippolettiho přeliv (fiedler.company/cs, 2022)

Výhody a nevýhody přelivů

Při správném a přesném změření hodnot, potřebných pro výpočet průtoku, především přepadové výšky, je měření průtoku pomocí přelivů velice přesné a lze měřit i malé průtoky. Naopak nevýhodami jsou například složitost instalace přelivu na vodním toku nebo zanášení a ucpávání přelivu nečistotami a naplaveninami, které následně negativně ovlivňuje měření (Boor et al., 1968).

1.2.3 Měření průtoků pomocí měrných žlabů

Při tomto způsobu měření průtoků, dojde k vybudování měrného žlabu, který způsobí zúžení profilu vodního toku, zvýšení dna žlabu, anebo se obě varianty použijí současně. Touto úpravou se zvýší rychlost proudění vody (Kříž et al., 1979).

Měrné žlaby se dělí na žlaby bez hrdla a žlaby s dlouhým hrdlem, přičemž žlaby s dlouhým hrdlem mají lepší technologické vlastnosti a jsou tedy přesnější při měření oproti žlabům bez hrdla. Nejpoužívanějšími žlaby pro měření průtoků jsou Parshallův a Venturiho žlab (Pytl, 2004).

Parshallův žlab

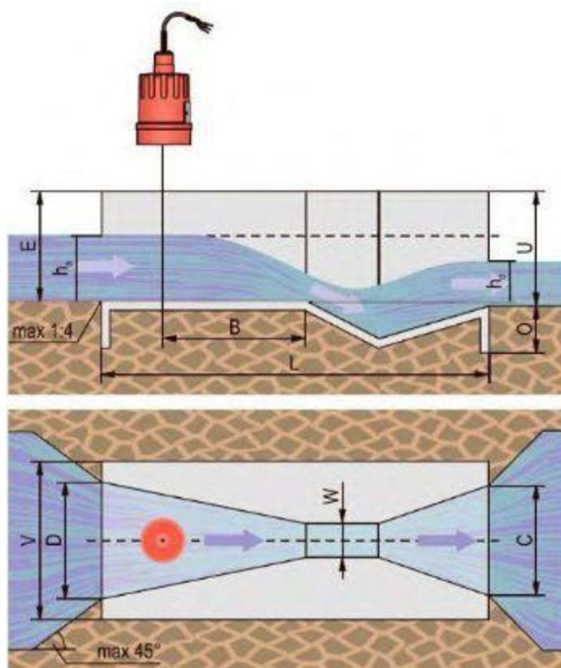
Parshallův žlab patří mezi žlaby s dlouhým hrdlem a pro měření se využívá především v částech s vyrovnaným rozsahem průtoků. Jedná se o žlab, který se nejprve bočně zužuje a má zvýšené vodorovné dno oproti přítokové části (viz

obr. 1.6 a 1.7). Toto zvýšení slouží k usazení nečistot a jiných látek před žlabem a nedochází tedy k následnému ovlivnění měření. V druhé části se hrdlo již nezúžuje, ale má konstantní šířku a dno žlabu je spádováno dolů. Ve třetí části žlabu se hrdlo opět rozšiřuje a dno stoupá směrem nahoru (PARS AQUA, 2009).

Bartůšek (1985) uvádí vzorec $Q = k * b * h^n$, kterým se vypočítá průtok v tomto měrném žlabu. Neznámé hodnoty k , b a n jsou stanoveny podle použitého typu žlabu a h označuje výšku přepadové vody, jejíž hodnota se změří ve stanovém místě zužující se části žlabu.



Obrázek 1.6: Pohled na Parshallův žlab (cdn.bitrix24.eu, 2022)



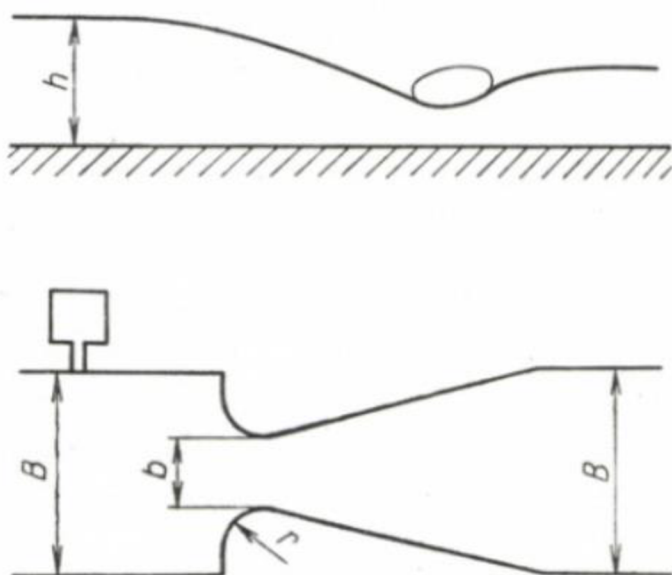
Obrázek 1.7: Podélný řez Parshallovým žlabem (cdn.bitrix24.eu, 2022)

Venturiho žlab

Jedná se o další často užívaný typ, který se oproti Parshallovu žlabu liší tím, že patří mezi žlaby bez hrdla. Jedná se o žlab s vodorovným dnem, v jehož nátokovém hrdle se zužuje průtočný profil, čímž dojde ke zvýšení hladiny vody a následně se žlab opět postupně rozšiřuje (viz obr. 1.8 a 1.9). Nevýhodou tohoto žlabu je, že pro přesné měření potřebuje vyšší hodnoty průtoku, zatímco u Parshallova žlabu lze počítat průtok i při nižším průtoku (Pytl, 2004).



Obrázek 1.8: Venturiho žlab (papay.sk, 2022)



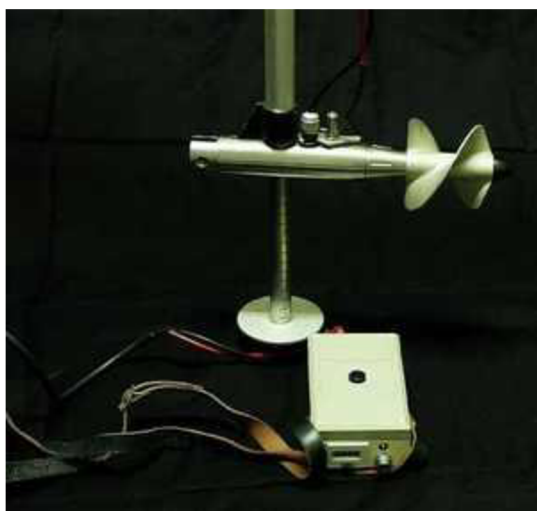
Obrázek 1.9: Podélný řez Venturiho žlabu (Bartušek, 1985)

Využití měrných žlabů je především v čistírnách odpadních vod a odpadních tocích, kde se měrné žlaby narozdíl od přelivů tolik nezanášejí. Jejich další výhodou je

například značná životnost, neboť materiálem na jejich výrobu je beton nebo ocel, díky které vydrží správně fungovat po dlouhou dobu. Naproti tomu mezi jejich nevýhody patří dodržení dokonale přesného usazení, jinak nebude měření správné, dále pak jsou využívány pro trvalé měření na jednom místě, takže jeden žlab nelze využít pro měření na více vodních tocích a také pomocí nich nelze měřit průtoky na vodních tocích, které mají větší spád (Kříž et al., 1979).

1.2.4 Měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule

Hydrometrická vrtule je zařízení, pomocí kterého se měří rychlost proudění vody a následně se tento údaj využije pro výpočet průtoku. Tato vrtule má šroubovitý tvar a je upevněna na tyči nebo lanu. Samotné upevnění vrtule je na otáčivém kloubu, který zajišťuje ideální natočení vrtule proti směru proudění vody (viz obr. 1.10). Rychlost proudění se měří v různých hloubkách vodního toku, a proto je tyč nebo lano opatřeno délkovou stupnicí, pomocí které se měří hloubka vrtule pod hladinou. Podle počtu otáček vrtule za dobu měření se poté vypočítá rychlost proudění v daném místě. Starší typy hydrometrických vrtulí měly mechanický ukazatel počtu otáček, avšak tento mechanismus je v současnosti nahrazen počítačem, který zaznamenává otáčky vrtule a současně z nich vyhodnocuje rychlost proudění v dané části vodního toku (Bezdiček, 1966; Jandora et al., 2002).



Obrázek 1.10: Hydrometrická vrtule (cksvv.vuv.cz, 2022)

Mattas (2014) říká, že proudění ve vodním toku se liší v závislosti na hloubce a vzdálenosti od břehu. Z tohoto důvodu je vhodné měřit rychlosti proudění na rovném úseku vodního toku, který má pravidelné dno a kde se vyskytuje jen málo břehových porostů, aby nedošlo k ovlivnění měření. Následně se rozdělí průtočný profil na jednotlivé úseky a pro každý úsek se ve svislém směru změří rychlost.

Nejpřesnějších výsledků se dosáhne, pokud se provede pět měření ve svislici, a to u dna, v jedné, ve třech a ve čtyřech pětinach hloubky a těsně u hladiny. Z těchto rychlostí se poté vypočte výsledná rychlost v dané svislici a průtok už se zjistí prostým vynásobením výsledné rychlosti a plochy svislice. Průtok v daném průtočném profilu se stanoví sečtením průtoků ze všech měrných svislic.

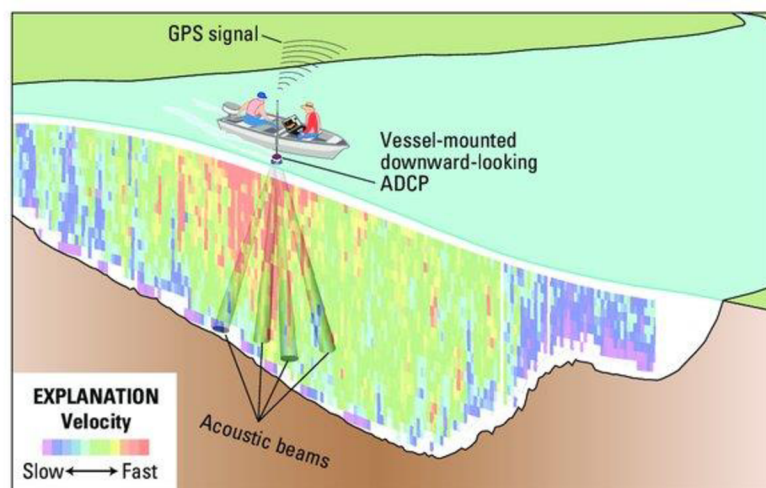
1.2.5 Měření průtoků pomocí indikátorových metod

Vodní toky špatně přístupné, ve vyšších polohách s nepravidelným nebo kamenitým dnem není možné měřit pomocí metod uvedených výše, ale využívá se pro ně indikátorová neboli chemická metoda. Tato metoda funguje na principu změny koncentrace chemické látky, většinou se jedná o kuchyňskou sůl, jejíž silný roztok se aplikuje na počátečním profilu, následně dojde k jejímu promísení vlivem proudění vody a na koncovém profilu se změří výsledná koncentrace (Jandora et al., 2002).

Existují dva postupy, kterými lze toto měření provést. Snazší, levnější a rychlejší způsob je aplikování měrné látky do vodního toku najednou, přičemž musí být počáteční a koncový měrný profil od sebe v dostatečné vzdálenosti, aby se indikátor dostatečně promísel. Následně se průtok určí podle množství použitého indikátoru a jeho zředovacího poměru. Jako druhou metodu popisuje Davie (2008) rovnoměrné aplikování indikátoru do vodního toku. Tento způsob je sice časově náročnější a je potřeba více indikátoru, ale provádí se po delší dobu, takže je výsledný průtok přesnější. Pro výpočet výsledného průtoky se v tomto případě použije vzorec $Q = q * \frac{C_t - C_d}{C_d - C_o}$, kde q značí aplikované množství indikátoru za jednu vteřinu, C_t je koncentrace aplikovaného roztoku, C_d je koncentrace v koncovém profilu a C_o je přirozená koncentrace indikátoru ve vodním toku.

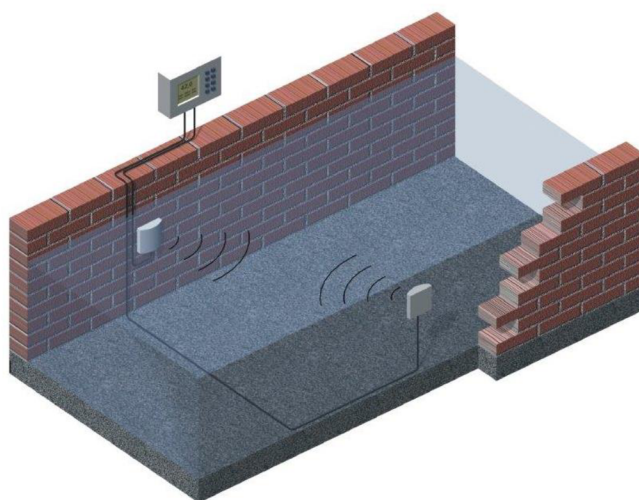
1.2.6 Měření průtoků pomocí ultrazvuku

Nejnovější způsob používaný pro měření průtoky je ultrazvuk. Celé měření funguje na principu Dopplerova jevu, kdy je na hladinu vodního toku umístěn ultrazvukový přístroj. Ten vysílá zvuk, který se odráží od částic a vzduchových bublin ve vodním toku (viz obr. 1.11). Při tomto odrazu se pozmění frekvence, kterou přístroj přijme a zaznamená, srovná s vyslanou frekvencí a z těchto údajů následně určí rychlost proudění vody.



Obrázek 1.11: Ultrazvukové měření pomocí Dopplerova jevu (researchgate.net, 2022)

V případě, že se ve vodě nenacházejí žádné odrazné prvky potřebné k měření, uvádí Jenčík (1998) způsob měření se dvěma ultrazvukovými přístroji (viz obr. 1.12), které jsou umístěny na pravém a levém břehu a nejsou přímo proti sobě. Následuje měření, kdy přístroje vyšlou ultrazvuk, z nichž první vysílá po proudu vody a druhý proti proudu. Z tohoto měření se získá čas potřebný k dosažení přístroje na opačné straně. Rychlost proudění vodního toku se získá z rozdílu časů dosažených při měření a průtok se poté určí vynásobením zjištěné rychlosti vodního toku a plochy průtočného profilu.



Obrázek 1.12: Ultrazvukové měření průtoku (pars-aqua.cz, 2022)

1.2.7 Měření průtoků pomocí konsumpční křivky

Posledním způsobem uváděným v této diplomové práci je měření použitím konsumpční křivky. Konsumpční křivka znázorňuje závislost průtoku na výšce hladiny, proto je nutné tu výšku nejprve změřit. K tomuto účelu se na svahu vodního

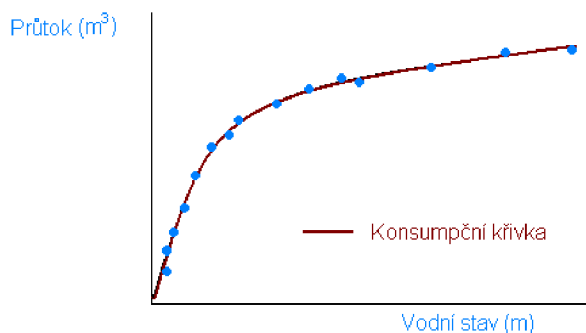
toku nebo mostním pilíři nacházejí vodočetné latě (viz obr. 1.13). Tyto latě jsou opatřeny délkovou stupnicí s dvoucentimetrovým dělením. Arabské číslice na stupnici určují decimetry, římské číslice pak jednotlivé metry. Netopil (1981) dále uvádí důležitý konstrukční prvek, kterým je zajištění, že výška o hodnotě nula centimetrů, bude níže, než jsou historicky známá minima na vodním toku.



Obrázek 1.13: Vodočetná lať (d34-a.sdn.cz, 2022)

V současné době se často uplatňuje limnigraf, který je schopen kontinuálně zaznamenávat data o výšce hladiny. Starší typ limnigrafu sestává ze zapisovacího válce s časovým mechanismem a zapisovací jehly s plovákem, pomocí které se zaznamenávají výškové údaje na válec. Maximální doba záznamu bez nutnosti přítomnosti obsluhy a výměny válce činí 7 dní. Novější typ limnigrafu funguje na stejném principu, ale má digitální záznamové zařízení a místo plováku se zde používá ultrazvuk. Následně jsou naměřená data automaticky odesílána příslušné pobožce daného povodí k dalšímu zpracování (Pavelková Chmelová a Frajer, 2013).

Následuje měření průtoků při různých vodních stavech, k čemuž se použije hydrometrická vrtule nebo ultrazvuk. Kvalita a přesnost výsledné křivky se odvíjí od celkového počtu měření. Z výsledků měření se vytvoří graf, na jehož osách se vyznačí vodní stav, nejčastěji v metrech, a průtok v m^3/s . Do tohoto grafu se poté vloží křivka procházející zjištěnými hodnotami, čímž dojde k vytvoření konsumpční křivky (viz obr. 1.14). Takto vytvořená křivka, slouží k rychlému určení téměř skutečného průtoku při různých vodních stavech, bez nutnosti provádět měření pro všechny hodnoty vodního stavu (Kunštátský a Patočka, 1971; Kemel, 2000).



• Měřené průtoky při daném vodním stavu

Obrázek 1.14: Konsumpční křivka (wikimedia.org, 2022)

1.3 Metody hodnocení časových řad průtoků

1.3.1 Popisné statistiky

Starý (2005) uvádí nejčastěji používané popisné statistiky, kterými jsou aritmetický průměr, minimum, maximum, medián, směrodatná odchylka a disperse, koeficient variace a koeficient asymetrie. Pomocí těchto statistik se blíže popíše zkoumaný soubor dat a určí se jeho další vlastnosti.

Aritmetický průměr

Nejběžněji používanou popisnou statistikou je aritmetický průměr, znázorňující průměrnou hodnotu průtoku, která je obvykle určována pro konkrétní měsíc nebo se stanovuje průměrná hodnota za rok. V případě roční hodnoty se počítá s průtoky od 1. listopadu do 31. října, kdy trvá takzvaný hydrologický rok. Tímto opatřením se zajišťuje, že sněhové srážky, které se vyskytují většinou až v listopadu a prosinci, budou zohledněny při analýze ročního průtoku (Jandora et al. 2002).

Minimum, maximum a medián

Pomocí prostého seřazení měřených dat od největšího po nejmenší, lze zjistit rozpětí hodnot a prostřední hodnotu. Nejmenší číslo po seřazení označuje minimum, naopak největší číslo určuje maximum. Hodnota uprostřed seřazených dat označuje medián, v případě, že je počet hodnot sudý, stanoví se medián aritmetickým průměrem dvou hodnot uprostřed (Starý, 2005).

Rozptyl a směrodatná odchylka

Rozptyl definují Drápela a Zach (1999) jako aritmetický průměr čtverců odchylek od neznámé x , který slouží ke stanovení variability hodnot kolem tohoto průměru a pro vyjádření vzájemné odlišnosti hodnot znaků. S rozptylem velmi úzce souvisí směrodatná odchylka, která se určí jako odmocnina z rozptylu a používá se k charakterizování variability. Směrodatná odchylka a rozptyl se určují vzorcem:

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

kde:

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

$D(Q)$ je rozptyl průtoků určovaného měsíce

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

Q_m je aritmetický průměr průtoků zkoumaného měsíce

n označuje počet roků měření

Koeficient variace

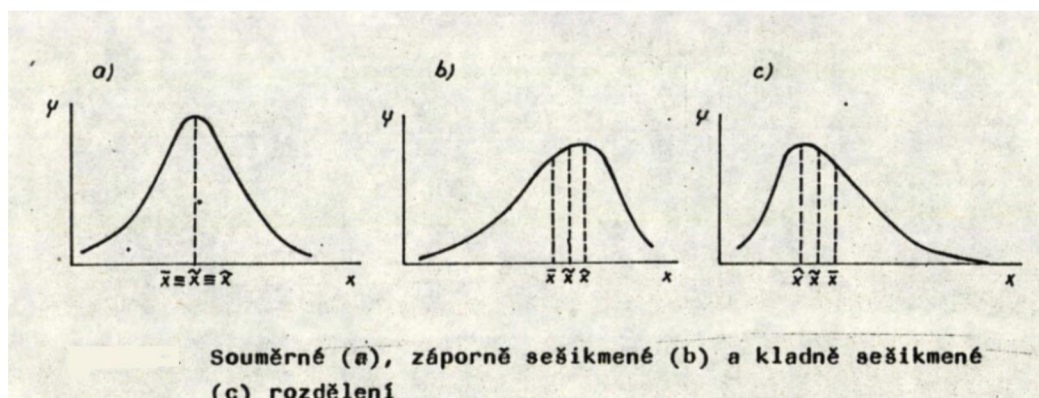
Tento koeficient vypovídá o významu průměrné odchylky od průměru, to znamená, kolik procent průměru představuje směrodatná odchylka. Tento koeficient je vhodný pro porovnání variability datových souborů s více úrovněmi a vypočítá se podílem směrodatné odchylky a aritmetického průměru (Brázdil, 1989).

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

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

Koeficient šikmosti (asymetrie)

Koeficient šikmosti je definován jako aritmetický průměr z třetích mocnin odchylek hodnot od aritmetického průměru vyjádřeného v jednotkách směrodatné odchylky. Tento koeficient je velice přesnou mírou nesouměrnosti, protože spočívá na všech pozorovaných hodnotách, avšak výpočet je poměrně náročný a složitý. V závislosti na hodnotách koeficientu se liší tvar výsledného grafu hustoty pravděpodobnosti (viz obr. 1.15). Když je tato hodnota menší než 0, je graf záporně sešikmený, když je rovna 0, je graf souměrný, a při hodnotách větších než 0 je kladně sešikmený (Patočka, 1956).



Obrázek 1.15: Graf hustoty pravděpodobnosti (Brázdil, 1989)

1.3.2 Jednoduchá a podvojná součtová čára

Jednoduchá součtová čára

Jedná se o metodu používanou pro znázornění průtoků za určité sledované období. Vytváření této čáry probíhá kumulativním přičítáním hodnot průtoků v průběhu zkoumaného období. Následně se tyto hodnoty vynesou do grafu a spojí křivkou. Takto vytvořený graf se proloží lineárně narůstající přímkou a podle odlišnosti součtové čáry od přímky lze vyvozovat možné příčiny tohoto rozdílu v odtoku. Nejběžnějšími příčinami ovlivňující průtok jsou změna množství srážek v určitém období, změna hospodaření na zemědělské půdě a vytváření jezů a vodních nádrží na vodním toku (Kemel, 2000).

Podvojná součtová čára

Dalším způsobem, kterým je možné znázornit vztah průtoků a srážek je podvojná součtová čára. Touto čarou se znázorňuje průběh chronologicky seřazených kumulativních hodnot průtoků a srážek zkoumané časové řady. Z takto vytvořeného grafu lze pozorovat změny a průběh odtokového koeficientu, který vyjadřuje poměr odtoku a srážek. V případě že se v grafu vyskytují výrazné odchylky od lineárního nárůstu, je možné je dále zkoumat a vyhodnocovat, čím jsou způsobeny (Kaňok, 1997).

1.3.3 Regresní analýza

Hlavní funkcí této analýzy je vystihnout pomocí regresní funkce průběh závislosti dvou neznámých hodnot x a y . Regresní funkce může mít ve vytvořeném grafu lineární, logaritmický, exponenciální nebo polynomický tvar. Z grafu lze také určit, jestli má funkce klesající nebo stoupající tendenci (Seger, 1993).

1.3.4 Mann-Kendallův test

Mann-Kendallův test se používá k vyhledávání a určování trendu v časových řadách. V případě, že mezi nimi existuje závislost, určují se jednotlivé výstupní parametry Mann-Kendallova testu. Jedná se o Mann-Kendallovu statistiku (S), $VAR(S)$, které tvoří vstupní údaje pro výpočet hodnoty Z . Tato hodnota popisuje velikost a směr trendu. Pokud je hodnota kladná, označuje rostoucí trend, pokud je hodnota záporná jedná se o trend klesající. Důležitost tohoto trendu se zpravidla testuje na hladině významnosti menší než 0,05, která se označuje p -value (Ahmed et al., 2015).

1.3.5 Empirická čára pravděpodobnosti překročení

Dostatečně dlouhou řadu dat o průtocích lze použít k vytvoření empirické čáry pravděpodobnosti překročení. Pro její stanovení je zapotřebí dle Sommera (1985)

uspořádat vstupní data sestupně podle velikost a následně pomocí Čegodajevova vzorce (viz níže) ke každé hodnotě vypočítat procentuální pravděpodobnost překročení.

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

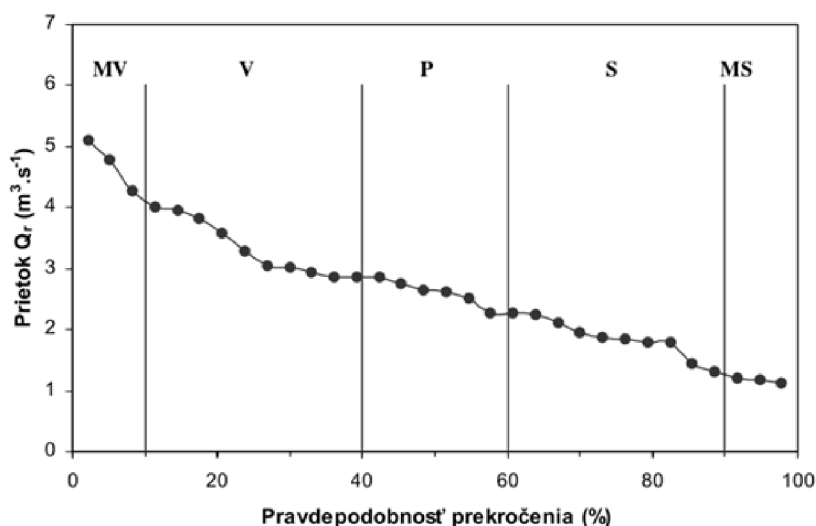
kde:

P_i je pravděpodobnost překročení

m je pořadí hodnoty v seřazeném seznam

n je celkový počet hodnot v souboru

Z takto zjištěných dat se poté vytvoří graf pravděpodobnosti překročení (viz obr. 1.16), ze kterého lze vyčíst, pravděpodobnost překročení jednotlivých průtoků.



Obrázek 1.16: Graf empirické čáry pravděpodobnosti překročení (is.muni.cz, 2022)

1.3.6 Autokorelační funkce

Stanovuje obecnou závislost hodnot v určitém čase na hodnotách dříve zjištěných. Jedná se o zvláštní druh korelační funkce, vyhodnocující hodnoty průtoků daného příčného řezu s jinou hydrologickou řadou na témže příčném řezu, zatímco korelační funkce vyhodnocuje hodnoty průtoků jednoho příčného řezu s hodnotami na jiném příčném řezu nebo dokonce jiném vodním toku. Výsledná závislost hodnot se stanovuje korelačním koeficientem, jež má hodnotu od -1 do 1. Tyto krajní hodnoty určují největší závislost hydrologických řad, naopak když je koeficient 0, není mezi hydrologickými řadami žádná závislost (Votruba a Broža, 1980).

1.3.7 Spektrální hustota

Pro zjištění skrytých periodických vlastností v hydrologických řadách, se používá metoda spektrální hustoty, která se počítá pomocí vzorce z Fourierovy 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

1.3.8 Dekompozice hydrologických řad

Metoda dekompozice se používá pro snazší pochopení hydrologických řad a následnou predikci jejich možného budoucího vývoje. Při procesu dekompozice se zkoumané řady rozdělí na čtyři části. Jedná se o trendovou, sezónní, cyklickou a náhodnou složku. Společně tyto složky dle Segera (1993) tvoří takzvanou systematickou složku označovanou jako Q_t , ve které mají výše uvedené složky aditivní nebo multiplikativní vztah. Aditivní vztah znamená součet jednotlivých složek:

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

U multiplikativního vztahu se jednotlivé složky násobí:

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

Trendová složka – T_t

Touto složkou se vyjadřuje předpokládaný vývoj analyzovaných hodnot v průběhu času. Výsledný zjištěný trend může být rostoucí, klesající nebo stagnovat kolem určitých hodnot a pak se označuje jako časová řada bez trendu. Tato složka se často stanovuje pomocí metody klouzavých průměrů, která je blíže popsána v další podkapitole.

Sezónní složka – S_t

Tato složka popisuje pravidelně se opakující výkyvy od trendové složky během jednoho roku. Příčiny těchto výkyvů mohou být různé, avšak nejčastěji jsou v případě vyhodnocování průtoků způsobeny v důsledku střídání ročního období. Větší hodnoty průtoků jsou zpravidla zaznamenány na jaře nebo po přivalových deštích naproti tomu nižší průtoky bývají v létě, kdy je vysoký výpar a málo srážek. Sezónní složku lze určit stejně jako trendovou složku pomocí metody klouzavých průměrů nebo pomocí aproximace periodickými funkcemi.

Cyklická složka – C_t

Cyklickou složkou se popisuje výkyv okolo trendu, z důvodu dlouhodobého cyklického vývoje. Perioda opakování je u této složky různá a tudíž se složitěji určuje. Její stanovení, respektive odhad, se provádí spektrální nebo filtrační analýzou dlouhodobé hydrologické řady.

Náhodná složka – e_t

Je to taková složka, která zůstane po rozložení hydrologické řady předchozími výše uvedenými složkami. Zahrnuje například nedokonalost měření nebo odchylky při výpočetních úpravách, tudíž je žádoucí tuto složku co nejvíce redukovat.

1.3.9 Metoda klouzavých průměrů

Tato metoda se používá ke stanovení trendové a sezónní složky. Výpočet klouzavých průměrů se provádí ze stanového počtu hodnot hydrologické řady. Pro výpočet trendové a sezónní složky se stanoví délka skryté periody, která se určí pomocí spektrální hustoty, a řád klouzavého průměru. Hodnota řádu se stanovuje individuálně v závislosti na zkoumaných datech, ale je vhodné počítat spíše s menšími řády. Při samotném výpočtu je nutno zohlednit, zda se počítají klouzavé průměry s lichou nebo sudou délkou skryté periody. V případě výpočtu klouzavých průměrů se sudou délkou skryté periody, se výsledná hodnota překrývá se vstupními hodnotami a graficky je toto zobrazení nejasné. Řešením je použít centrovaného klouzavého průměru, který se určí jako prostý aritmetický průměr dvou sousedních hodnot a výsledná grafická podoba je následně přehledná a nepřekrývá se. Častěji je proto počítáno s lichou délkou periody, protože výsledná vyrovnaná hodnota leží mimo původní hodnoty a odpadá nutnost další úpravy (Cyhelský, 1986).

2 Materiál a metody

2.1 Cíl práce

Cílem této práce byla analýza časových řad průtoků ve vybraném území. Konkrétně se jedná o porovnání průtoků ve dvou výrazně odlišných desetiletích na třech vnořených povodích v povodí řeky Berounky (uzávěrový profil v Plzni). Porovnáním se zjistí, zda se průtoky ve stejných uzavěrových profilech, ale po prodělání významných změn (nejen) v povodích, liší nebo ne.

2.2 Použité metody a software

K vyhodnocení průtoků a srážek jsou použity metody: podvojná součtová čára, regresní analýza, Mann-Kendallův test a dvouvýběrový t-test pro nezávislé výběry, které jsou dále podrobně popsány. Mapové výstupy, které jsou uvedeny v této diplomové práci, jsou vytvořeny v programu ArcMap 10 s připojením webových mapových služeb WMS. Pro zpracování tabulek, grafických a statistických údajů, které slouží k vyhodnocení výsledků, je použit program Microsoft Excel s rozšířením XLSTAT.

Zvolená povodí se analyzují za dvě desetiletá hydrologická období, a to 1981-1990 a 2012-2021. Tato období jsou zvolena záměrně, protože období 1981-1990 znázorňuje poslední desetiletí před převratem, který znamenal velikou změnu nejen politickou, sociální a ekonomickou, ale také došlo k velkým změnám ve využívání krajiny, zemědělství a dalších složkách přírodního prostředí. Pro porovnání bylo zvoleno období 2012-2021, které představuje poslední ucelené desetiletí ze současnosti.

Podvojná součtová čára

Prvním způsobem, kterým jsou průtoky a srážky na jednotlivých povodích vyhodnoceny je podvojná součtová čára. Pro její určení je nezbytné nejprve chronologicky seřadit a kumulativně sečíst měsíční hodnoty průtoků a srážek za období 1981-1990 a 2012-2021. V další části je každá měsíční hodnota vydělena celkovou sumou a vynásobená číslem 100, čímž se získají dílčí velikosti vyjádřené v procentech. Tyto procentuální hodnoty průtoků a srážek se vloží do grafu, který znázorňuje jejich závislost a zobrazuje případné odchylky (Kaňok, 1997). V případě výrazných odchylek je možné je dále zkoumat a vyhodnocovat, čím jsou způsobeny.

Koeficient odtoku

Z údajů o srážkových úhrnech a hodnotách odtoku, je v další části výsledků sestavena tabulka koeficientu odtoku. Tímto koeficientem se udává poměr mezi odtokem a srážkami (Kemel, 2000). Vzhledem k délce časových řad, jsou hydrologické roky rozděleny na dvě období. První období trvá od listopadu do dubna a zohledňuje také tající sněhové srážky, které ovlivňují výšku odtoku. Druhé období trvá od května do října a zachycuje koeficient odtoku během většiny vegetačního období.

Regresní analýza

Hlavní funkcí této analýzy je vystihnout pomocí regresní funkce průběh závislosti dvou neznámých hodnot x a y . Regresní funkce může mít ve vytvořeném grafu lineární, logaritmický, exponenciální nebo polynomický tvar. Z grafu lze také určit, jestli má funkce klesající nebo stoupající tendenci (Seger, 1993). Nejčastěji používaným druhem regresní analýzy, je lineární regresní analýza, jejíž trend je popisován regresní přímkou, u které se stanovuje také tvar její rovnice. Rovnice regresní přímky má tvar $y = ax + b$, kde x je nezávislá proměnná a y je závislá proměnná. Regresní koeficienty „ a “ a „ b “ definují vlastnosti dané přímky, tedy sklon a posun. Koeficient „ a “ definuje směrnici přímky. Z této hodnoty lze určit sklon přímky a hlavně trend, který je v případě kladné hodnoty rostoucí a v případě záporné hodnoty klesající. Druhým koeficientem je „ b “, který označuje průsečík regresní přímky s osou y . Při následném vyhodnocení regresní analýzy je nezbytné zohlednit koeficient p -value, udávající hladinu významnosti. Nejčastěji se používá hladina významnosti 5 % (p -value $< 0,05$) a v případě, že je při výpočtu dosaženo nižší hodnoty, je možné výsledek označit za statisticky průkazný (Egermayer a Novák, 1964).

Mann-Kendalův test

Vyhledávání a určování trendu v časových řadách se provádí pomocí Mann-Kendalova testu. Tímto testem jsou analyzovány měsíční průtoky na zvolených povodích za období 1981-1990 a 2012-2021. Vstupní data tvoří chronologicky seřazené hodnoty průtoků pro jednotlivé měsíce a hodnoty průtoků za rok. Analýza se tedy provádí ve dvou obdobích na deseti hodnotách průtoků pro každý měsíc a roční průtok. Pro výpočet Mann-Kendalova testu je použit program Microsoft Excel s rozšířením XLSTAT. Výpočet se provádí postupně, kdy nejprve je zapotřebí pomocí vzorce stanovit Mann-Kendalovu statistiku (S) a hodnotu $VAR(S)$.

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

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

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

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

V dalším kroku se tyto hodnoty použijí ve vzorci pro výpočet výsledné neznámé Z .

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

Tato hodnota nabývá kladných nebo záporných čísel, přičemž kladné číslo značí zvyšující se trend a záporné číslo naopak trend snižující. Pro tento test je také důležité stanovení hranice významnosti, takzvanou p -value, která se obvykle stanovuje menší než 0,05 (Ahmad et al., 2015).

Dvouvýběrový t-test pro nezávislé výběry

Poslední metodou, která je použita k analyzování časových řad průtoků, je dvouvýběrový t-test pro nezávislé výběry. Tento test se používá pro testování hypotézy rovnosti středních hodnot dvou statistických souborů, které jsou však na sobě nezávislé. V této práci se jedná o hodnoty průtoků jednotlivých povodí za období 1981-1990 a 2012-2021. Závěrečné hodnocení se stanoví z vypočítaných hodnot t Stat a t krit (2) kdy, pokud je t Stat menší než t krit (2), tak je potvrzena nulová hypotéza, která předpokládá shodné střední hodnoty. Pokud je však t Stat větší než t krit (2), znamená to, že nulová hypotéza je zamítnuta a platí alternativní, která udává, že střední hodnoty průtoků jsou rozdílné. Následně se porovnáním středních hodnot souborů určí, jestli se průtoky zvyšují nebo snižují. Stejně jako u předchozích analýz, i zde se pracuje s hladinou významnosti 0,05 (Jaroš, 1994).

2.3 Změna land use

Významným faktorem, který má vliv na množství odtékající vody je využití zemědělské krajiny. V osmdesátých letech byla zemědělská půda jinak využívána než v současné době. Velké plochy zaujímal orná půda, která byla na zamokřených

místech odvodňována, čímž se zvyšoval povrchový i podpovrchový odtok. V současnosti se plocha orné půdy snížila a byla nejčastěji převedena na trvalý travní porost. Dále se na mnoha místech změnil způsob hospodaření a jsou vytvářena vodohospodářská opatření, která pomáhají zadržet vodu v krajině (Kvítek, 2013).

Pro zvolená povodí jsou zpracovány mapové výstupy změny land use pro období 1990 a 2018. Jako podkladová data pro mapové a číselné výstupy jsou zvolena data Corine land cover 1990 a 2018 z vědeckého programu copernicus. Tato data se nacházejí na webové stránce <https://land.copernicus.eu/> a po registraci jsou zdarma ke stažení.

2.4 Popis jednotlivých povodí

Vyhodnocení průtoků v této diplomové práci bylo provedeno na třech vnořených povodích řeky Berounky s uzávěrovým profilem v Plzni (viz obr. 2.17) Údaje o srážkových úhrnech jsou zjištěny aritmetickým zprůměrováním hodnot ze srážkoměrných stanic v dané oblasti. Uzávěrové profily jednotlivých povodí jsou stanoveny v místě, kde se rovněž nachází měrný profil ČHMI.

2.4.1 Povodí Hamerského potoka

Prvním a nejmenším je povodí Hamerského potoka, nacházející se na rozhraní Plzeňského a Karlovarského kraje u státní hranice s Německem. Celková plocha je 100,18 km² a uzávěrový profil je ve městě Planá. Hamerský potok se následně po 7 kilometrech vlévá do Mže a tvoří její levostranný přítok. Srážkové úhrny pro dané území byly určeny ze srážkoměrných stanic u Plané a u obce Tři Sekery.

Klimatické charakteristiky

Povodí Hamerského potoka se z hlediska klimatických oblastí, které definuje Quitt (1971) nachází v oblastech MT 3, MT 4 a okrajovou částí zasahuje také do MT 5. Klimatické charakteristiky typické pro tyto oblasti jsou uvedeny v tabulce 2.1. Mapové znázornění klimatických oblastí ve všech třech povodích je zobrazeno na obrázku 2.18.

Tabulka 2.1: Klimatické charakteristiky povodí Hamerského potoka (Quitt, 1971; zpracování vlastní)

Klimatické charakteristiky	MT 3	MT 4	MT 5
Počet letních dnů	20-30	20-30	30-40
Počet dnů s průměrnou teplotou 10 °C a více	120-140	140-160	140-160

Počet mrazových dnů	130-160	110-130	130-140
Průměrná teplota v lednu (°C)	-3 - -4	-2 - -3	-4 - -5
Průměrná teplota v dubnu (°C)	6-7	6-7	6-7
Průměrná teplota v červenci (°C)	16-17	16-17	16-17
Průměrná teplota v říjnu (°C)	6-7	6-7	6-7
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více (mm)	110-120	110-120	100-120
Srážkový úhrn ve vegetačním období (mm)	350-450	350-450	350-450
Srážkový úhrn v zimním období (mm)	250-300	250-300	250-300
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	60-100	60-80	60-100

Geologie

Povodí Hamerského potoka se nachází na geologické jednotce Český masiv, na horninovém celku moldanubika. Geologický podklad je tvořen granitoidy a biotickými pararulami (CENIA).

Geomorfologie

Z geomorfologického hlediska se povodí Hamerského potoka nachází v provincii Česká vysočina, dále v Šumavské subprovincii, Českoleské oblasti a ve dvou geomorfologických celcích, a to Český les a Podčeskoleská pahorkatina (Demek, 1965). Reliéf těchto celků je na mnoha místech členitý, kopcovitý, zvrásněný a je zde vysoký podíl lesů.

Pedologie

V povodí převažují středně hluboké (hloubka půdy 30-60cm) středně těžké půdy, jako jsou kambizem nebo podzoly a podél vodního toku se vyskytují také glejové půdy a pseudogleje (VÚMOP).

2.4.2 Povodí Mže

Dalším je povodí od pramene řeky Mže, které zahrnuje také výše uvedené povodí a končí uzávěrovým profilem ve Stříbře. Rozlohou je tedy rozsáhlejší, plocha činí 1 117,49 km² a tok řeky Mže je dlouhý 59 km. Toto povodí je již rozlehlejší, a proto se průměrné srážkové úhrny zjišťovaly z celkem 6 srážkoměrných stanic, aby se dosáhlo co nejrelevantnější srážkové hodnoty. Použity tedy byly stanice u

Konstantinových lázní, Přimdy, Stříbra, Tachova a již výše uvedené stanice z povodí Hamerského potoka.

Klimatické charakteristiky

Povodí Mže se z hlediska klimatických oblastí, nachází mimo již uvedené oblasti u Hamerského potoka také v oblastech MT 7, MT 9, MT 10, MT 11 a CH 7. Klimatické charakteristiky typické pro tyto oblasti jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Klimatické charakteristiky povodí Mže (Quitt, 1971; zpracování vlastní)

Klimatické charakteristiky	MT 7	MT 9	MT 10	MT 11	CH 7
Počet letních dnů	30-40	40-50	40-50	40-50	10-30
Počet dnů s průměrnou teplotou 10 °C a více	140-160	140-160	140-160	140-160	120-140
Počet mrazových dnů	110-130	110-130	110-130	110-130	140-160
Průměrná teplota v lednu (°C)	-2 - -3	-3 - -4	-2 - -3	-2 - -3	-3 - -4
Průměrná teplota v dubnu (°C)	6-7	6-7	7-8	7-8	4-6
Průměrná teplota v červenci (°C)	16-17	17-18	17-18	17-18	15-16
Průměrná teplota v říjnu (°C)	6-7	7-8	7-8	7-8	6-7
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více (mm)	100-120	100-120	100-120	90-100	120-130
Srážkový úhrn ve vegetačním období (mm)	400-450	400-450	400-450	350-400	500-600
Srážkový úhrn v zimním období (mm)	250-300	250-300	200-250	200-250	350-400
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	60-80	60-80	50-60	50-60	100-120

Geologie

Povodí Mže se nachází na geologické jednotce Český masiv, na horninovém celku moldanubika a tepelsko-barrandienské jednotce. Geologický podklad tvoří granitoidy, biotické pararuly, dvojslídne granity, ruly, migmatit a břidlice. (CENIA).

Geomorfologie

Povodí Mže geomorfologicky navazuje na povodí Hamerského potoka a dále zahrnuje Krušnohorskou subprovincii, oblast Karlovarská vrchovina a celek Tepelská vrchovina. Povodí zasahuje také do Poberounské subprovincie, oblast Plzeňská pahorkatina a celků Plaská pahorkatina a Švihovská vrchovina (Demek, 1965). V těchto oblastech přechází kopcovitý reliéf v rovinnější, přibývá zemědělské půdy na úkor lesů a také zastavěných ploch a osídlení obyvatelstvem.

Pedologie

V oblasti povodí Mže převládají středně těžké půdy, dominantními typy jsou kambizem a pseudoglej, v blízkosti vodních toků se vyskytují glejové půdy (VÚMOP).

2.4.3 Povodí Berounky

Třetím a nejrozsáhlejším analyzovaným povodím je společné povodí řek Mže, Radbuzy a Úhlavy po jejich soutoku ve městě Plzeň. Zde již má řeka název Berounka, tudíž je v další části práce toto povodí nazýváno jako povodí Berounky. Uzávěrový profil s měrným profilem se nachází v Plzni nedaleko za soutokem a jedná se tedy o značně rozlehlé povodí složené ze tří dílčích povodí III. řádu o celkové rozloze 3 978,17 km². Počet srážkoměrných stanic je rozšířen o dalších 7, aby co nejvíce pokryly celé území a nejpřesněji vystihovaly průměrnou hodnotu srážek. Mimo již výše uvedené se jedná o srážkoměrné stanice u Domažlic, Horšovského Týna, Klatov, Nýrska, v Plzni a dvě stanice z vyšší nadmořské výšky Čachrov a Hojsova Stráž.

Klimatické charakteristiky

Povodí Berounky zahrnuje klimatické oblasti z předchozích dvou povodí, a navíc se zde nachází ještě oblast CH 6. Klimatické charakteristiky pro tuto oblast jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Klimatické charakteristiky povodí Berounky (Quitt, 1971; zpracování vlastní)

Klimatické charakteristiky	CH 6
Počet letních dnů	10-30
Počet dnů s průměrnou teplotou 10 °C a více	120-140
Počet mrazových dnů	140-160
Průměrná teplota v lednu (°C)	-4 - -5
Průměrná teplota v dubnu (°C)	2-4
Průměrná teplota v červenci (°C)	14-15
Průměrná teplota v říjnu (°C)	5-6
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více (mm)	140-160
Srážkový úhrn ve vegetačním období (mm)	600-700
Srážkový úhrn v zimním období (mm)	400-500
Počet dnů se sněhovou pokryvkou	120-140

Geologie

Povodí Berounky se nachází na geologické jednotce Český masiv, na horninovém celku moldanubika a tepelsko-barrandiérské jednotce. Geologický podklad tvoří granitoidy, biotické pararuly, dvojslídne granity, ruly, migmaty, břidlice, v oblasti Českého lesa také gabro, křemenné diority a svory (CENIA).

Geomorfologie

Povodí Berounky je plošně největší a zasahuje kromě již výše uvedených celků také do oblasti Šumavské hornatiny a celků Šumava a Šumavské podhůří. Tato oblast je členitou vrchovinou s erozně pozměněným terénem a četnými, převážně jehličnatými lesy. Východní část povodí zasahuje také do Česko-moravské subprovincie, oblast Středočeská pahorkatina a celek Blatenská pahorkatina (Demek, 1965).

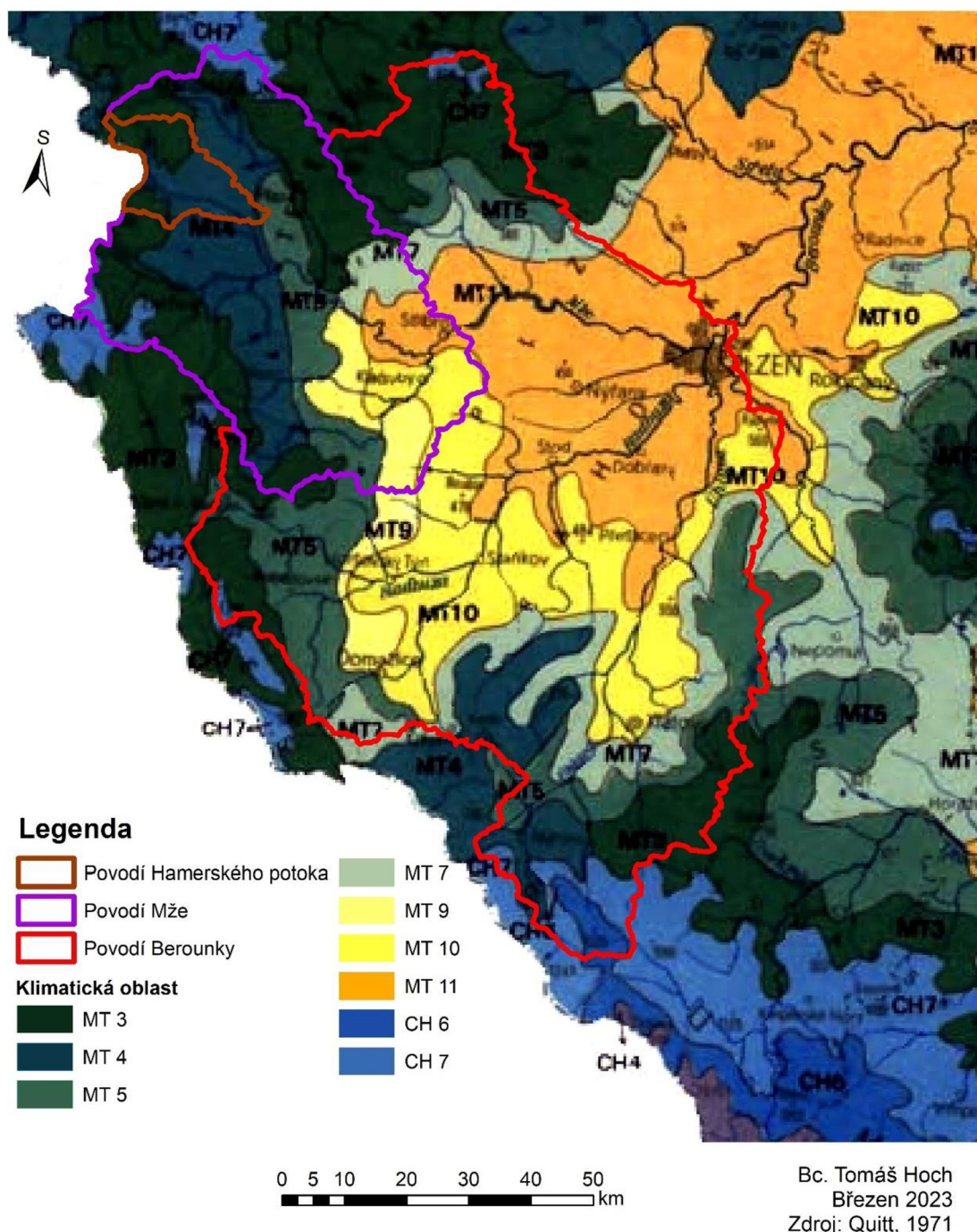
Pedologie

Pedologická struktura povodí Berounky navazuje na předchozí uvedené povodí, kde v podhůří Českého lesa převažují kambizem a pseudoglej. Ve východní části povodí se však již půdní struktura mění, v nivách vodních toků převažují hluboké půdy

fluvizemě. Mimo vodní toky se v této nížinatější oblasti vyskytují převážně hluboké, středně těžké půdy jako je hnědozem a luvizem. Naopak kambizem zde ubývá a vyskytuje se pouze na malé části území (VÚMOP).



Obrázek 2.17: Mapa zobrazující jednotlivá povodí a meteorologické stanice (ČHMÚ, zpracování vlastní)



Obrázek 2.18: Mapa klimatických oblastí (Quitt, 1971; zpracování vlastní)

2.5 Použitá data

V diplomové práci jsou použita volně dostupná historická data z období 1980-2021, která jsou zdarma ke stažení z webového portálu Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Průtoky jsou vyhodnocovány na základě měsíčních dat z měrných profilů v Plané, ve Stribře a v Plzni. Dále jsou použita měsíční data o průměrné denní teplotě, sněhových srážkových úhrnech a dešťových srážkových úhrnech. Tyto údaje jsou získány z meteorologických stanic u následujících obcí: Planá, Tři Sekery,

Konstantinovy lázně, Přimda, Stříbro, Tachov, Domažlice, Horšovský Týn, Klatovy, Nýrsko, Plzeň, Čachrov a Hojsova Stráž.

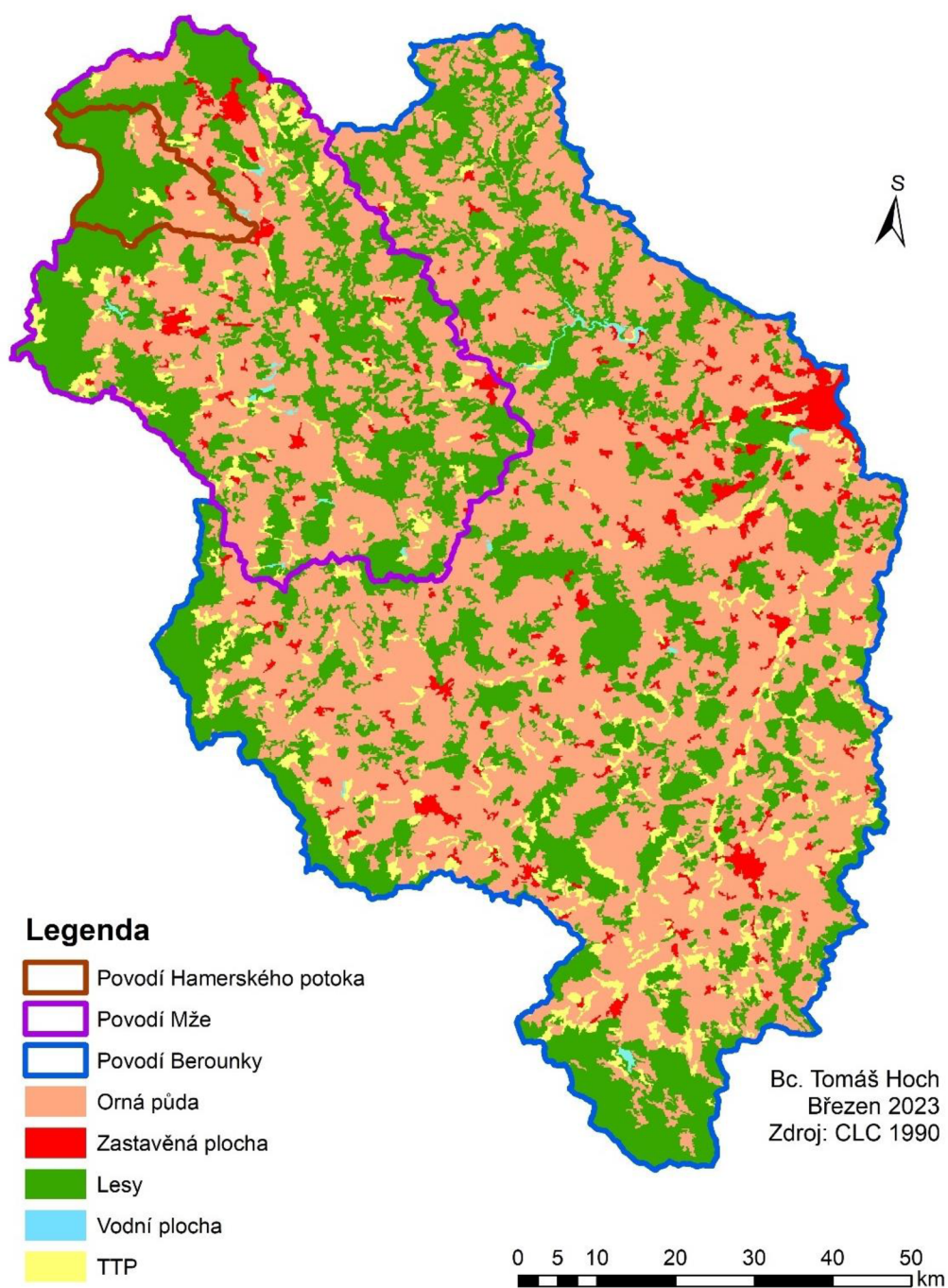
Pro zpracování klimatických charakteristik jednotlivých povodí je použita kniha Klimatické oblasti Československa (Quitt, 1971). Webové stránky Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy (VÚMOP) a České informační agentury životního prostředí (Cenia) jsou využity jako zdrojová data k popisu geologických a pedologických charakteristik.

Při vytváření mapy povodí jsou použity jako podklad mapy České republiky, které jsou součástí WMS služeb, poskytovaných Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním.

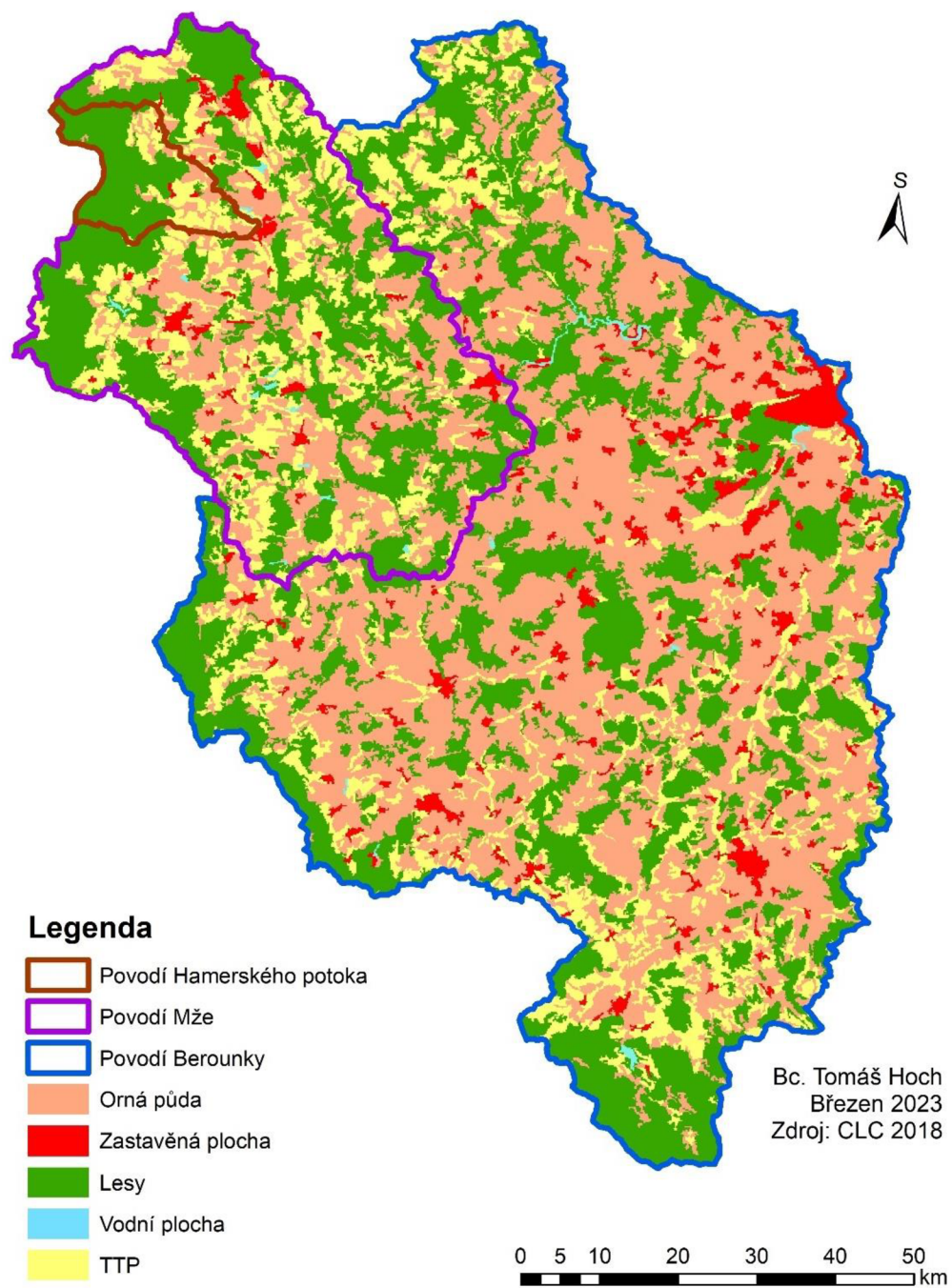
3 Výsledky a diskuse

3.1 Změna land use

Na základě podkladů Corine land cover 1990 a 2018 bylo zpracováno grafické porovnání změny využití krajiny jednotlivých povodí (viz obr. 3.19 a 3.20). Pro větší přehlednost a přesnější interpretaci výsledků, je procentuální zastoupení jednotlivých ploch kultur uvedeno v tabulce 3.4.



Obrázek 3.19: Land use 1990 (Corine, zpracování vlastní)



Obrázek 3.20: Land use 2018 (Corine, zpracování vlastní)

Tabulka 3.4: Porovnání plochy land use v roce 1990 a 2018 (Zpracování vlastní)

	Povodí Hamerského potoka		Povodí Mže		Povodí Berounky	
	1990	2018	1990	2018	1990	2018
Kultura						
Orná půda	34,43 %	15,4 %	46,96 %	28,05 %	54,67 %	42,55 %
Les	60,88 %	62,08 %	44,43 %	44,92 %	36,38 %	36,64 %
TTP	3,45 %	21,26 %	5,34 %	23,61 %	5,28 %	16,33 %
Zastavěná plocha	1,20 %	1,22 %	2,89 %	3,02 %	3,38 %	4,18 %
Vodní plocha	0,04 %	0,04 %	0,38 %	0,4 %	0,29 %	0,3 %

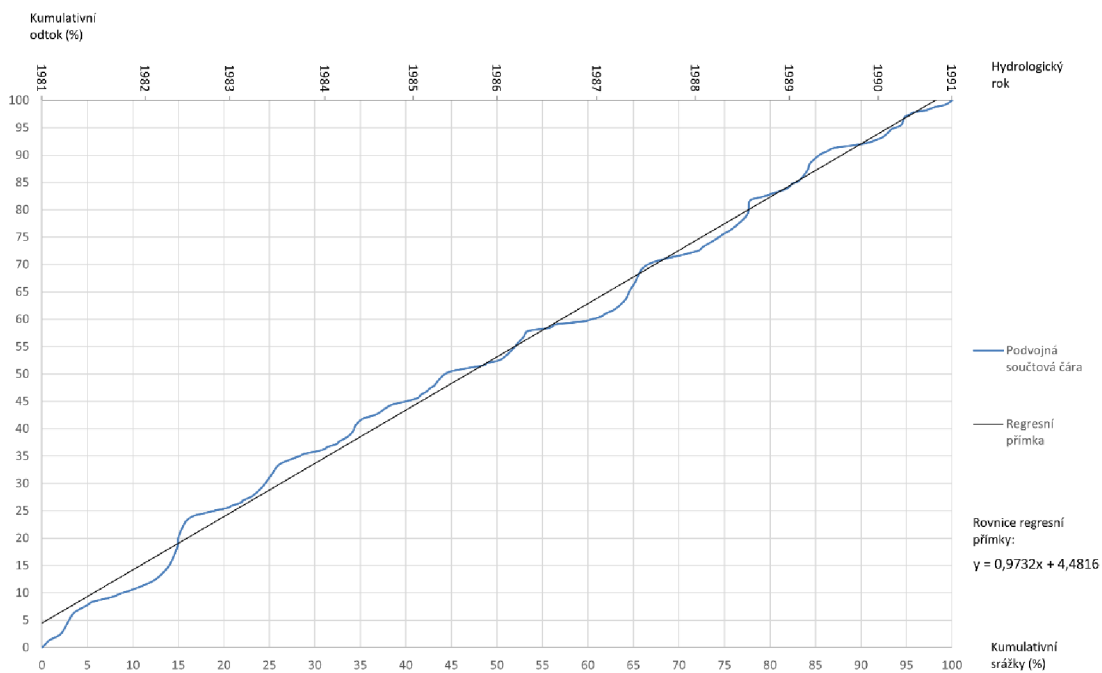
Na základě získaných výsledků změny land use, je zaznamenána výrazná změna v roce 2018, kdy od roku 1990 došlo ke snížení plochy orné půdy, a naopak přibylo trvale trvalých travních porostů. Tato změna je nejvíce patrná v povodích Hamerského potoka a řeky Mže, kde ubylo plochy orné půdy o téměř 20 %. Tyto pozemky se často nacházely ve svažitém terénu, byly erozně ohrožené, zemědělsky obtížně obhospodařovatelné, a proto došlo k jejich zatravnění.

Způsob využívání a skladbu kultur v krajině před rokem 1989 popisuje Lokoč a Lokočová (2010). Ve své knize zachycuje změny, které nastaly po roce 1948, kdy došlo ke změně režimu. Jedná se především o scelování jednotlivých malých pozemků orné půdy ve velké celky, přechod na obdělávání těžkou mechanizací, odvodňování zemědělské půdy a také snížení počtu druhů pěstovaných plodin.

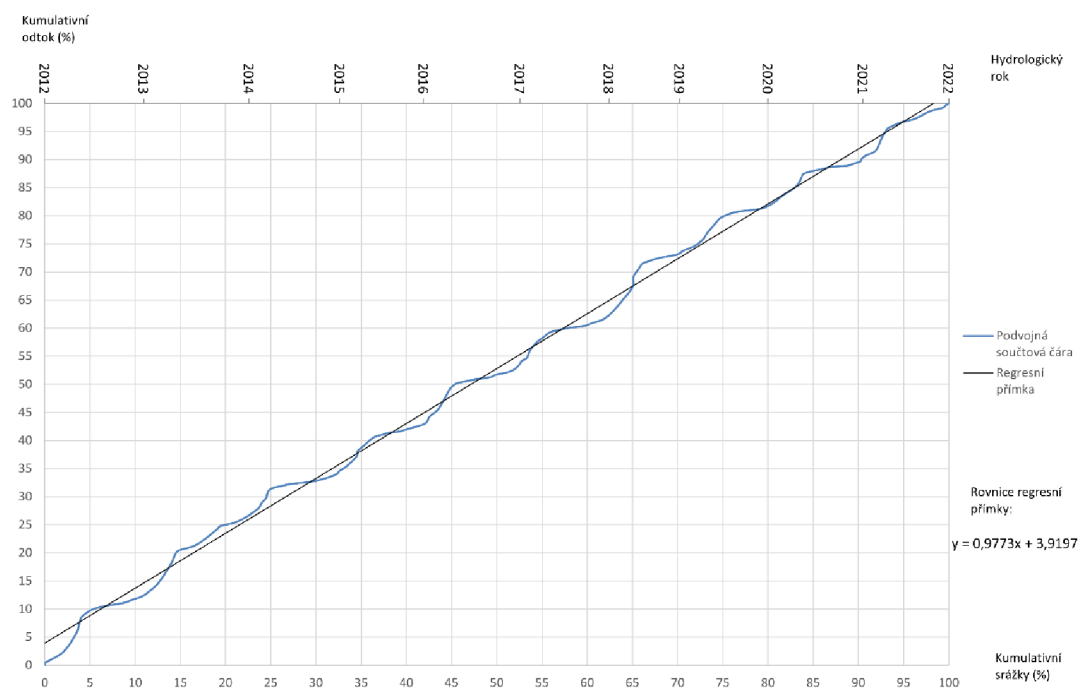
Změny po roce 1989 se zabývají Kolář (2018) a Miko a Hošek (2009). Na základě svých výzkumů, popisují změny ve využívání krajiny, kdy se zejména v méně úrodných oblastech v příhraničí a oblastech vrchovin převáděly plochy orné půdy na trvale travní porost. Dále porovnávají způsob využití krajiny před a po roce 1989. Na základě tohoto srovnání zjistili, že po roce 1989 došlo ke snížení plochy orné půdy na celém území České republiky o 19 %, a naopak se zvýšily plochy trvale travních porostů a zastavěné plochy.

3.2 Podvojná součtová čára

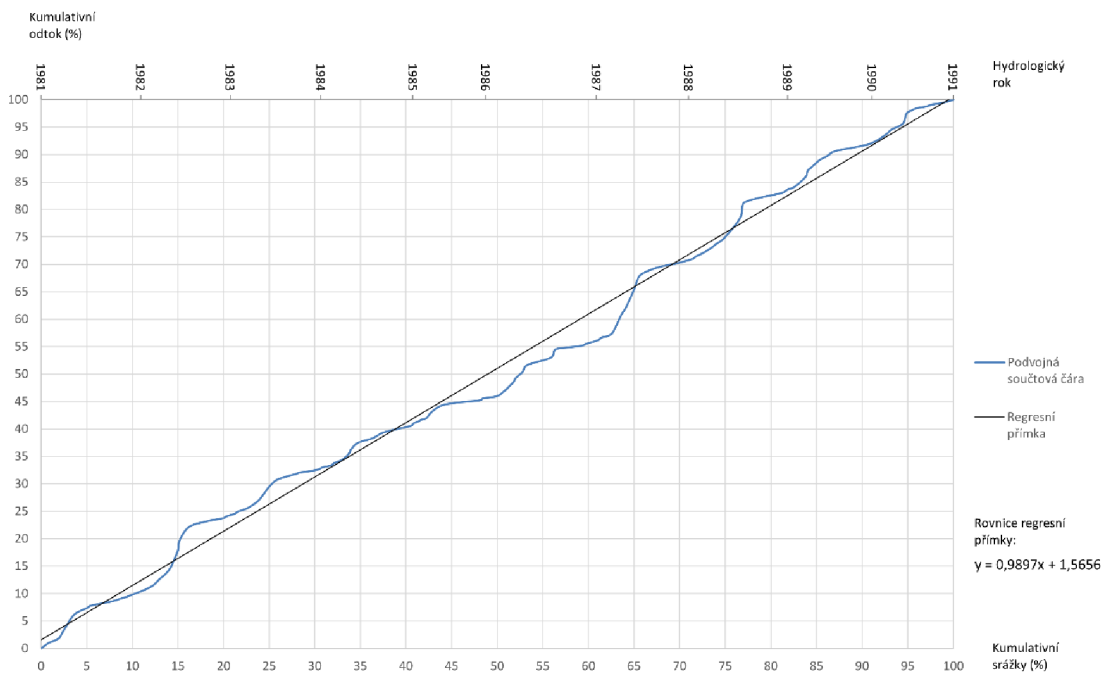
Na obrázcích 3.21 až 3.26 jsou graficky znázorněny podvojně součtové čáry jednotlivých povodí za obě analyzovaná období.



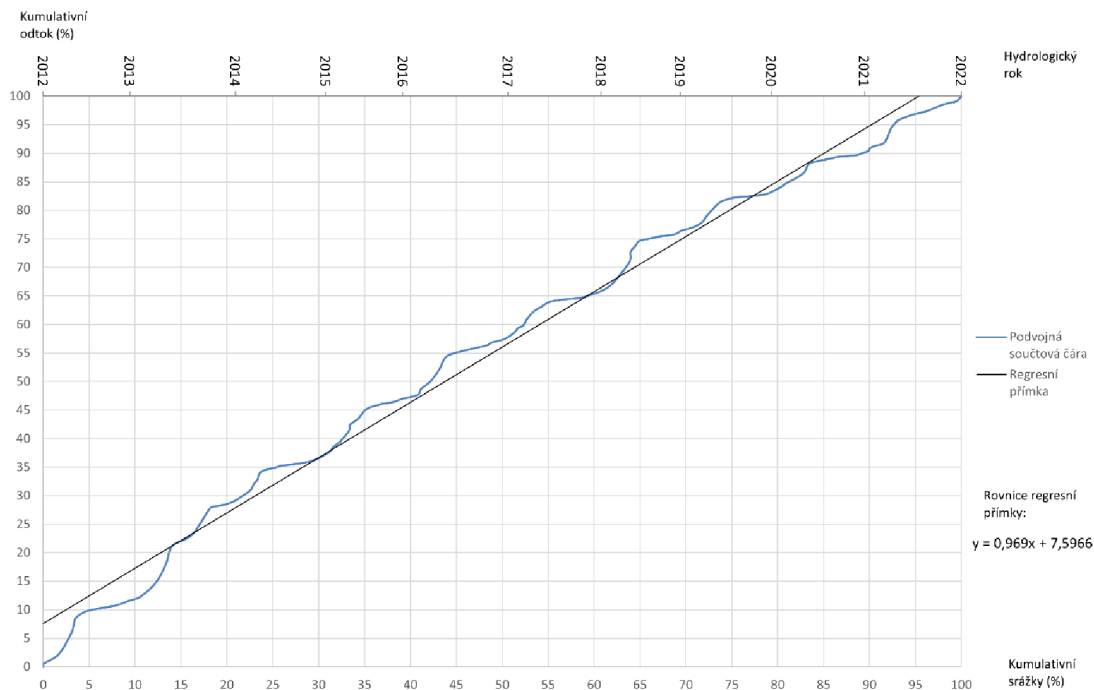
Obrázek 3.21: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Hamerského potoka za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní)



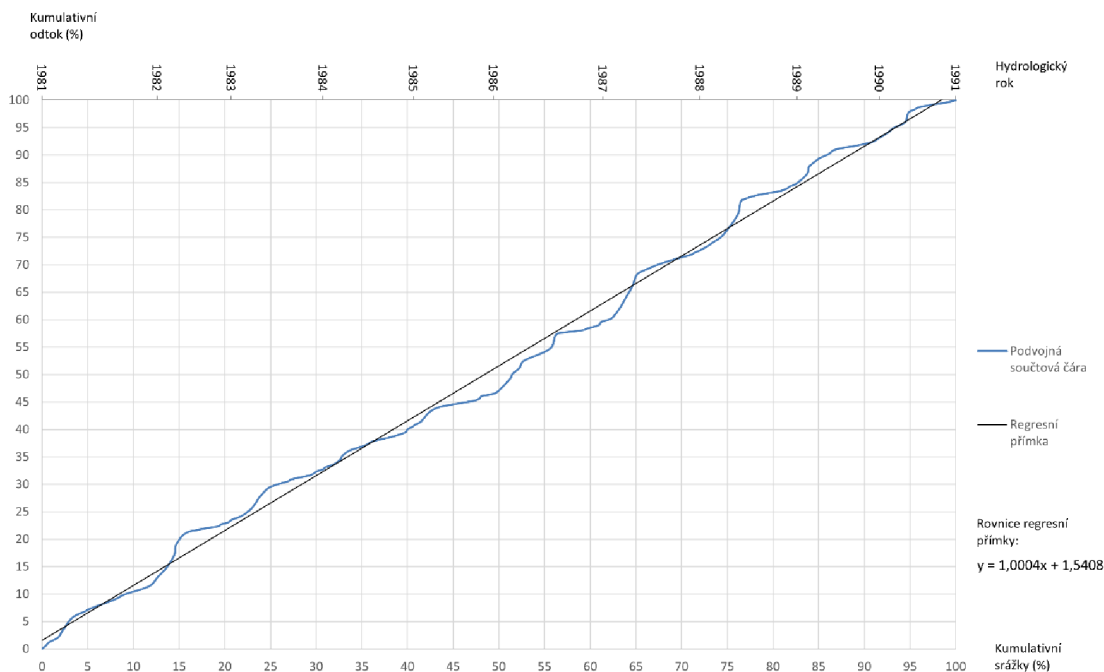
Obrázek 3.22: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Hamerského potoka za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní)



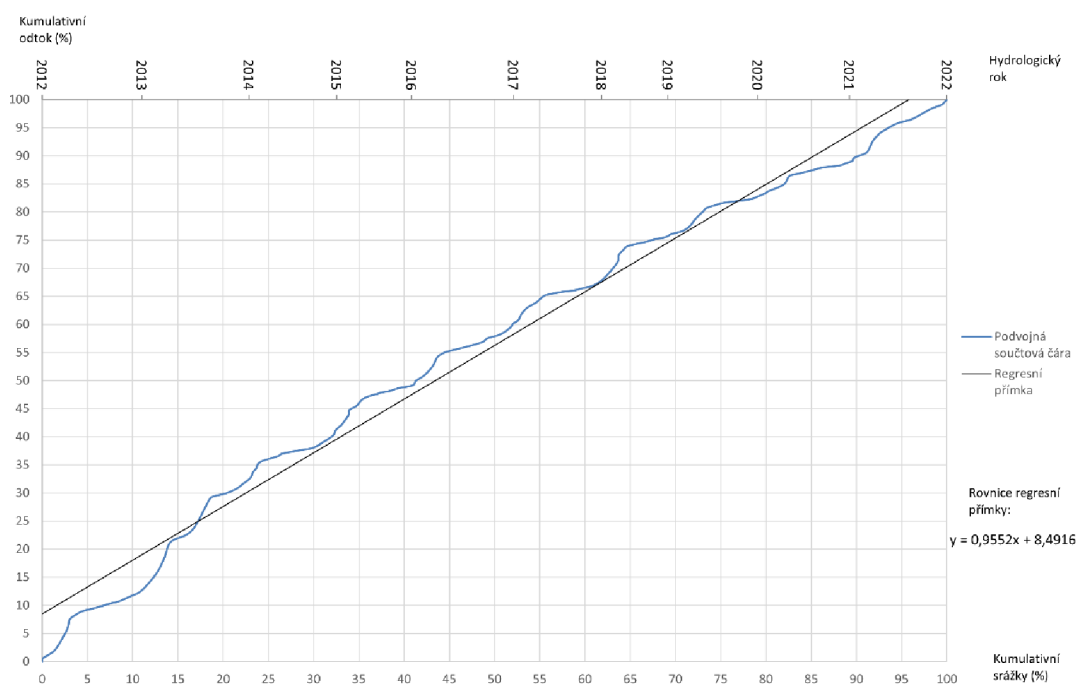
Obrázek 3.23: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Mže za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní)



Obrázek 3.24: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Mže za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní)



Obrázek 3.25: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Berounky za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní)



Obrázek 3.26: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Berounky za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní)

V grafech podvojných součtových čar se vyskytuje několik významnějších změn oproti lineárnímu průběhu. Významného nárůstu odtoku a pouze nepatrného přírůstu srážek si lze povšimnout v první polovině hydrologických roků 1982, 1987 a 2013. Tento nárůst je způsoben jarním táním sněhové pokrývky, které však není

zahrnuto v grafu, který obsahuje pouze dešťové srážky. Odtok je tedy tvořen vodou z tajících sněhových srážek, které byly v uvedených letech nadprůměrné a způsobily tyto výraznější výkyvy. V roce 2013 byly nadprůměrné úhrny dešťových srážek, které způsobily vyšší odtok (v tomto roce byly v ČR v květnu a červnu dokonce výrazné povodně) v druhé polovině hydrologického roku. V grafech se rovněž vyskytují také poklesy odtoků při přibývajících srážkách, především v druhé polovině hydrologického roku. Tyto poklesy jsou typické pro vegetační období, kdy je část srážkové vody spotřebována rostlinami, takže jsou nižší průtoky. V tomto období je také vyšší teplota oproti zimnímu období, takže je větší výpar, a tedy i nižší odtok z povodí. Například rok 1985 má velmi nízkou hodnotu odtoku vody z povodí, především v druhé polovině hydrologického roku. Tento výkyv je způsoben výrazně nižšími dešťovými srážkovými úhrny, které byly v daném roce celkem o 186 mm nižší, než je dlouhodobý průměr pro danou oblast, tedy 659 mm.

Ze získaných výsledků je patrná také změna regresního koeficientu, který je na povodích řek Mže a Berounky větší za období 1981-1990, takže je poměrově vyšší odtok ke srážkám. Toto zjištění snížení odtoku potvrzují také následující výsledky.

Kliment a Matoušková (2005) provedli ve svém výzkumu vyhodnocení změn průtoků také pomocí podvojně součtové čáry. Pro svůj výzkum zvolili povodí řeky Otavy s časovou řadou 1962-2002, ve které zaznamenaly vyšší přírůstky průtoků na konci zimního a začátku jarního období, a naopak v letním období, byly hodnoty průtoků nižší.

3.2.1 Koeficient odtoku

Pro vyhodnocování povodí, byly na základě výše zjištěných hodnot odtoku a srážek, vypočteny také koeficienty odtoku pro obě analyzovaná období. Hodnoty koeficientů odtoku jednotlivých povodí jsou vyneseny v tabulce 3.5, 3.6 a 3.7.

Tabulka 3.5: Koeficienty odtoku pro povodí Hamerského potoka (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient	Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient
1981	XI – IV	0,82	2012	XI – IV	0,71
	V–X	0,30		V–X	0,16
1982	XI – IV	1,37	2013	XI – IV	0,61
	V–X	0,26		V–X	0,29
1983	XI – IV	0,79	2014	XI – IV	0,65
	V–X	0,29		V–X	0,12
1984	XI – IV	0,66	2015	XI – IV	0,58
	V–X	0,33		V–X	0,16
1985	XI – IV	0,70	2016	XI – IV	0,57
	V–X	0,20		V–X	0,15
1986	XI – IV	0,62	2017	XI – IV	0,63
	V–X	0,16		V–X	0,17
1987	XI – IV	0,94	2018	XI – IV	0,82
	V–X	0,28		V–X	0,16
1988	XI – IV	0,77	2019	XI – IV	0,50
	V–X	0,34		V–X	0,14
1989	XI – IV	0,74	2020	XI – IV	0,51
	V–X	0,18		V–X	0,12
1990	XI – IV	0,61	2021	XI – IV	0,68
	V–X	0,26		V–X	0,23

Na základě zjištěných výsledků, byly hodnoty koeficientu odtoku pro povodí Hamerského potoka dále analyzovány pomocí t-testu pro nezávislé výběry. Při porovnávání hodnot prvního období (od listopadu do dubna) i druhého období (od května do října) odhalil t-test snížení střední hodnoty koeficientu odtoku v posledním desetiletí ve srovnání s obdobím 1981-1990. Střední hodnota koeficientu odtoku v zimním období se snížila z původních 0,8 na 0,63 a to na hladině významnosti 0,02, v letním období se snížila střední hodnota koeficientu z původních 0,26 na 0,17 a to na hladině významnosti 0,003.

Tabulka 3.6: Koeficienty odtoku pro povodí Mže (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient	Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient
1981	XI – IV	0,55	2012	XI – IV	1,26
	V–X	0,22		V–X	0,11
1982	XI – IV	1,38	2013	XI – IV	0,60
	V–X	0,22		V–X	0,26
1983	XI – IV	0,49	2014	XI – IV	0,54
	V–X	0,19		V–X	0,12
1984	XI – IV	0,53	2015	XI – IV	0,72
	V–X	0,25		V–X	0,12
1985	XI – IV	0,39	2016	XI – IV	0,44
	V–X	0,21		V–X	0,14
1986	XI – IV	0,53	2017	XI – IV	0,36
	V–X	0,30		V–X	0,10
1987	XI – IV	0,90	2018	XI – IV	0,93
	V–X	0,23		V–X	0,09
1988	XI – IV	0,85	2019	XI – IV	0,29
	V–X	0,24		V–X	0,08
1989	XI – IV	0,61	2020	XI – IV	0,32
	V–X	0,21		V–X	0,09
1990	XI – IV	0,59	2021	XI – IV	0,43
	V–X	0,16		V–X	0,19

Na základě zjištěných výsledků, byly hodnoty koeficientu odtoku pro povodí Mže dále analyzovány pomocí t-testu pro nezávislé výběry. Při porovnávání hodnot prvního období i druhého období odhalil t-test snížení střední hodnoty koeficientu odtoku v posledním desetiletí ve srovnání s obdobími 1981-1990. Střední hodnota koeficientu odtoku v zimním období se snížila z původních 0,55 na 0,38 a to na hladině významnosti 0,02, v letním období se snížila střední hodnota z původních 0,17 na 0,11 a to na hladině významnosti 0,007.

Tabulka 3.7: Koeficienty odtoku pro povodí Berounky (ČHMÚ, zpracování vlastní)

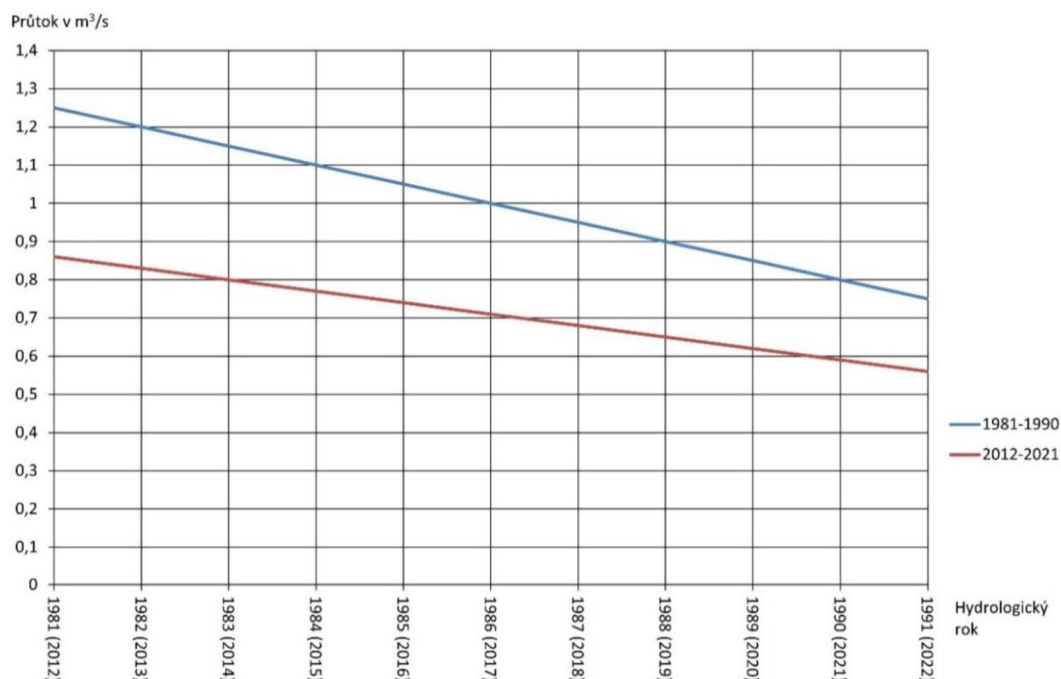
Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient	Hydrologický rok	Období	Odtokový koeficient
1981	XI – IV	0,48	2012	XI – IV	0,42
	V–X	0,19		V–X	0,10
1982	XI – IV	0,73	2013	XI – IV	0,42
	V–X	0,13		V–X	0,25
1983	XI – IV	0,41	2014	XI – IV	0,35
	V–X	0,17		V–X	0,11
1984	XI – IV	0,31	2015	XI – IV	0,38
	V–X	0,18		V–X	0,10
1985	XI – IV	0,37	2016	XI – IV	0,25
	V–X	0,13		V–X	0,11
1986	XI – IV	0,40	2017	XI – IV	0,29
	V–X	0,23		V–X	0,09
1987	XI – IV	0,64	2018	XI – IV	0,35
	V–X	0,18		V–X	0,08
1988	XI – IV	0,53	2019	XI – IV	0,23
	V–X	0,15		V–X	0,07
1989	XI – IV	0,41	2020	XI – IV	0,20
	V–X	0,15		V–X	0,07
1990	XI – IV	0,39	2021	XI – IV	0,31
	V–X	0,11		V–X	0,15

Na základě zjištěných výsledků, byly hodnoty koeficientu odtoku pro povodí Berounky dále analyzovány pomocí t-testu pro nezávislé výběry. Při porovnávání hodnot prvního období i druhého období odhalil t-test snížení střední hodnoty koeficientu odtoku v posledním desetiletí ve srovnání s obdobím 1981-1990. Střední hodnota koeficientu odtoku v zimním období se snížila z původních 0,46 na 0,31 a to na hladině významnosti 0,008, v letním období se snížila střední hodnota z původních 0,16 na 0,11 a to na hladině významnosti 0,02.

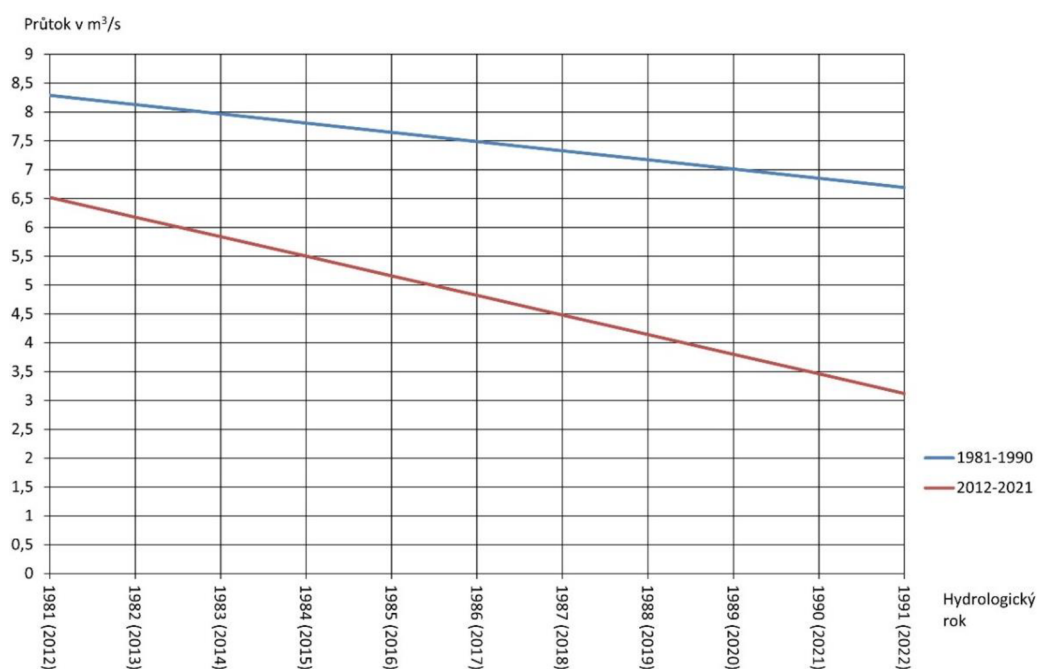
3.3 Regresní analýza

Další metodou použitou k analýze měsíční průtoků na jednotlivých povodích, je regresní analýza, která je zpracována v programu Microsoft Excel. Výsledky jsou grafy srovnávající regresní přímky jednotlivých povodí za obě zjišťovaná období,

znázorňující očekávaný vývoj hodnot průtoků v průběhu časové řady (viz obrázky 3.27, 3.28 a 3.29).



Obrázek 3.27: Graf regresní přímky pro povodí Hamerského potoka (ČHMÚ, zpracování vlastní)

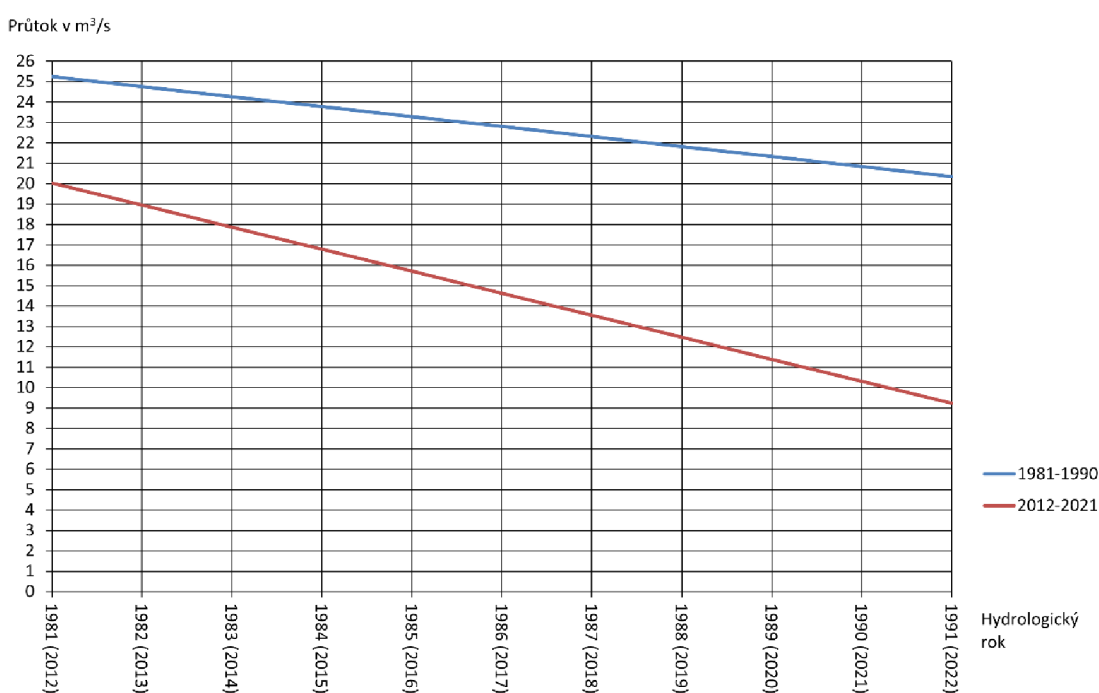


Obrázek 3.28: Graf regresní přímky pro povodí Mže (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Graf regresní přímky Hamerského potoka vykazuje za obě období klesající vývoj průtoků. Je zde také patrný rozdíl v očekávaném průměrném měsíčním průtoku, který v roce 1981 činil 1,25 m³/s, zatímco v roce 2012 to bylo 0,87 m³/s. Důležitým parametrem této přímky je také hodnota p-value, která má pro období 1981-1990

hodnotu 0,017 a pro období 2012-2021 hodnotu 0,076. Podle směru regresních přímk je v obou případech znatelný pokles průtoků, avšak pouze v období 1981-1990 došlo k dosažení hladiny významnosti p-value menší než 0,05, čímž je tento klesající trend statisticky průkazný.

Hodnoty průtoků na středně velkém povodí řeky Mže také vykazují dle regresní přímky klesající trend a odlišnost ve velikosti, kdy v roce 1981 byla průměrná hodnota 8,3 m³/s a v roce 2012 to bylo 6,5 m³/s. Na tomto povodí je statisticky průkazný pokles průtoků v období 2012-2021 s hodnotou p-value 0,006. Pro období 1981-1990 je hodnota p-value 0,43, takže zde nelze s jistotou statisticky prokázat snižování průtoků.



Obrázek 3.29: Graf regresní přímky pro povodí Berounky (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Třetí graf regresních přímk popisuje vývoj průtoků na společném povodí Berounky. Stejně jako v přechozích případech, i zde mají průtoky dle regresní přímky klesající charakter a je také patrný počáteční rozdíl průtoků. Déle pak přímka pro období 2012-2021 má větší sklon než přímka pro období 1981-1990, a naznačuje změnu, kdy se během desetiletého období očekávaný měsíční průtok snížil z počátečních 20 m³/s na méně než 10 m³/s. Potvrzení nebo vyvrácení tohoto tvrzení je závislé na hodnotě p-value. Ta je pro období 1981-1990 rovna 0,35, která značí, že zde trend není statisticky průkazný. Pro druhé období je hodnota 0,003, která statisticky potvrzuje předchozí hypotézu, že se průtoky v tomto posledním desetiletí výrazně snižují. Shrnující výsledky regresní analýzy jsou uvedeny v tabulce 3.8.

Tabulka 3.8: Souhrnná tabulka regresních analýz (zpracování vlastní)

	Trend 1981-1990	p-value	Trend 2012-2021	p-value
Hamerský potok	Klesající	0,017	-	0,076
Mže	-	0,43	Klesající	0,006
Berounka	-	0,35	Klesající	0,003

Analýzou průtoků vodních toků se zabývají také Kašpárek a Kožin (2022), kteří zkoumali jejich změnu na celkem 41 povodích v České republice. Ve svém výzkum zjistili, že téměř na všech povodích, mimo povodí řek Bečvy a Ohře, došlo ke snížení průtoků o 5 % až 17 %. Tento pokles průtoků byl nejvíce znatelný v období od dubna do konce srpna.

3.4 Mann-Kendalův test

Zjištěné výsledky Mann-Kendalova testu, které zachycují nějaký trend a jsou statisticky průkazné, jsou uvedeny v tabulkách 3.9 a 3.10. Ty obsahují vyhodnocené měsíční a roční řady s výslednou hodnotou Z, p-value, směrem trendu a s popisem o které povodí se jedná a v jakém období.

Tabulka 3.9: Vyhodnocení časové řady 1981-1990 pomocí Mann-Kendalova testu (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Povodí	Období	Z	p-value	Trend
Hamerský potok	Květen	-1,211	0,049	klesající
	Srpen	-1,312	0,032	klesající
Berounka	Srpen	-1,513	0,012	klesající

Tabulka 3.10: Vyhodnocení časové řady 2012-2021 pomocí Mann-Kendalova testu (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Povodí	Období	Z	p-value	Trend
Hamerský potok	Prosinec	-1,412	0,02	klesající
Mže	Prosinec	-1,513	0,012	klesající
Berounka	Prosinec	-1,615	0,007	klesající

Pomocí Mann-Kendalova testu se podařilo zachytit klesající trend průtoků v měsíci květnu a srpnu, který byl v období 1981-1990. V období 2012-2021 byl zachycen a potvrzen velice zajímavý klesající trend prosincových průtoků, a to na všech třech analyzovaných povodích.

Mann-Kendallův test pro vyhodnocení průtoků použili také Kliment et al. (2011), kteří se zaměřili na povodí Šumavy, Jeseníků a Krušných hor v období 1962-2008. Ve svém výzkumu zjistili statisticky průkazný pokles průtoků na všech vodních tocích v květnu a červnu. Další výzkum provedl Královec (2009), který zkoumal povodí řek Opavy a Opavice s časovou řadou od roku 1962 do 2006. Mann-Kendallovým testem zaznamenal pro řeku Opavu klesající trend měsíčních průtoků od května do července a také u ročního průtoků. Pro Opavici byl klesající trend průtoků zaznamenán v květnu a červnu.

Langhammer a Bernsteinová (2020) analyzovali tímto testem celkem 8 povodí nacházející se na Šumavě, v Krkonoších, Orlických horách a Beskydech za období 1952-2018. Toto období pro potřeby testu rozdělili na dvě části, první 1952-1988 a druhé 1989-2018. V prvním období nebyl nalezen žádný trend, ale v druhém období zaznamenaly klesající trend průtoků na povodích řeky Vydry, Mumlavy, Úpy a Vsetínské Bečvy v měsících březnu, dubnu a květnu.

Příčiny snížení prosincových průtoků v období 2012-2021

Tato část analyzuje pomocí Mann-Kendallova testu další data, která mají vliv na hodnoty průtoků a mohou tak být příčinou snížení prosincových průtoků. Jedná se o dešťové a sněhové srážky a teplotu.

Prvním zjišťovaným faktorem jsou prosincové dešťové srážky, analyzované Mann-Kendallovým testem za období 2012-2021. Výsledky testu na všech třech povodích neprokázaly žádnou změnu trendu, protože hodnoty p-value vysoce převyšují hladinu statistické významnosti. Z tohoto výsledku vyplývá, že dešťové srážkové patrně nejsou příčinou změny průtoků.

Množství sněhových srážek má také vliv na odtok vody, a proto byla provedena analýza za měsíce listopad a prosince. Testem byl zjištěn klesající trend srážek, avšak hodnota p-value dosahuje nejlépe hodnoty 0,1, a to u povodí Berounky. Na základě tohoto zjištění sice dochází ke snižování sněhových srážek, ale zatím tento výsledek není statisticky průkazný, takže ani změnu úhrnů sněhových srážek nelze označit za příčinu poklesu průtoků.

Dalším faktorem je teplota, která ovlivňuje výpar vody z povrchu a tím dochází ke snižování odtoku a následně i samotných průtoků ve vodních tocích. Při hodnocení prosincových teplot na povodích však Mann-Kendallův test neprokázal žádný trend, takže ani teplotu nemůžeme označit za příčinu poklesu průtoků.

3.5 T-test pro nezávislé výběry

Výsledky dvouvýběrového t-testu pro nezávislé výběry pro všechna tři vnořená povodí jsou uvedeny v tabulce 3.11.

Tabulka 3.11: Výsledky dvouvýběrového t-testu (ČHMÚ, zpracování vlastní)

Povodí	Hamerský potok	Mže	Berounka
Střední hodnota (m ³ /s) 1981-1990	1,01	7,53	22,82
Střední hodnota (m ³ /s) 2012-2021	0,72	4,82	14,65
t stat	3,72	4,02	4,39
t krit (2)	1,97	1,97	1,97
p-value	2,47.10 ⁻⁴	8,28.10 ⁻⁵	1,81.10 ⁻⁵
t stat > t krit (2)	ano	ano	ano
Změna průtoků	snížení	snížení	snížení

Provedeným t-testem bylo na hladině spolehlivosti 0,05 dokázáno snížení střední hodnoty průtoků na všech třech analyzovaných povodích. Střední hodnoty průtoků se snížily přibližně o jednu třetinu oproti srovnávací hodnotě z období 1981-1990.

Průtoky vodních toků se zabývala také Bažatová (2009), která prováděla výzkum průtoků v povodí řeky Lomnice za období 1975-2008. Ve svých výsledcích zaznamenala snížení hodnot průtoků v zimních a letních měsících. Další výzkum provedla Lamačová (2011) na vodních tocích Lysina, nacházející se v Karlovarském kraji, a Červík, nacházející se v Moravskoslezských Beskydech. Analyzovala časovou řadu průtoků za období 1990-2006 a zaznamenala klesající trend průtoků na obou vodních tocích v letních měsících.

Změnu odtokového režimu zaznamenali také Horáček et al. (2011) na povodí Rakovnického potoka. Analyzovali vývoj měsíčních průtoků za období 1966-1988 a 1989-2008. Na základě výsledků uvádí v období 1989-2008 pokles průtoků ve všech měsících. Nejvýraznější změnu však zaznamenali v jarních a letních měsících, kdy se průměrné hodnoty průtoků snížili téměř o 50 % oproti hodnotám z období 1966-1988.

Závěr

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, literární rešerši a praktickou část. Literární rešerše popisuje základní hydrologické pojmy týkající se povodí a odtoku. Dále jsou zde uvedeny a popsány způsoby, kterými se měří průtoky na vodních tocích. Druhá část rešerše se zabývá a popisuje jednotlivé metody pro popisování a vyhodnocování časový řad průtoků. Praktická část se zaměřuje na vyhodnocení dvou časových řad na třech do sebe vnořených povodích. Časové řady průtoků jsou vyhodnoceny pomocí vybraných metod, z nichž některé jsou uvedeny také v literární rešerši.

Časové řady průtoků jsou vyhodnoceny pomocí podvojně součtové čáry, regresní analýzy, Mann-Kendallovu testu a t-testu pro nezávislé výběry. Zjištěné výsledky jsou porovnány s dalšími výzkumy, které byly zaměřené na analýzu a vyhodnocení průtoků na vodních tocích v České republice, které provedli Kliment a Matoušková (2005), Kliment et al. (2011), Královec (2009), Kašpárek (2022), Bažatová (2009), Langhammer a Bernsteinová (2020), Lamačová (2011) a Horáček et al. (2011).

Po porovnání těchto zjištěných informací a výsledků výzkumů s touto diplomovou prací je možné konstatovat, že na území České republiky dochází v posledních letech ke snižování průtoků. Tato diplomová práce zaznamenala klesající trend prosincových průtoků v období 2012-2021 a to na všech třech vyhodnocovaných povodích. Jedná se tedy o pokles nejen na malém dílčím povodí, ale také na velkém povodí. Tato změna tedy není způsobena rozdílnými geografickými a klimatickými podmínkami nebo plochou povodí. Dalším průkazným výsledkem je snížení průměrných průtoků ve všech sledovaných povodích mezi desetiletími 1981-1990 a 2012-2021, a to přibližně o jednu třetinu. Tato změna je patrně způsobena změnou klimatu (především změnou srážkových charakteristik a zvýšením teplot) a změnou ve způsobu využívání krajiny oproti osmdesátým létům 20. století, která je v práci dokladována.

Seznam použité literatury

Knižní zdroje, publikace

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

Bažatová, T. (2009). *Změny srážko-odtokových poměrů a antropogenní úpravy v povodí Lomnice*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Fakulta přírodovědecká.

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

Blažek, V. et al. (2006). *Voda v České republice*. Pro Ministerstvo zemědělství vydal Consult, Praha. ISBN 80-903482-1-1.

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

Brázdil, R. (1989). *Statistické metody v geografii – cvičení*. 1. vydání. Rektorát UJEP, Brno. ISBN 80-210-0041-4.

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

Cyhelský, L. (1986). *Teorie statistiky*. 2. vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Čamrová, L. (2007). *Ochrana před povodněmi v urbanizovaných územích*. IREAS, Institut pro strukturální politiku, Praha. ISBN 978-80-86684-48-2

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

Davie, T. a Quinn, N. (2019). *Fundamentals of hydrology*. 3. vydání. Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-0-415-85870-0.

Demek, J. (1965). *Geomorfologie českých zemí*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.

Drápela, K. a Zach, J. (1999). *Statistické metody I (pro obory lesního, dřevařského a krajinného inženýrství)*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno. ISBN 80-7157-416-3.

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

-
- Egermayer, F. a Novák, I. (1964). *Regresní a korelační analýza pro ekonomy*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Havlík, V. (2001). *Hydraulika 20: příklady*. 2. vydání. Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-02355-9.
- Horáček, S. et al. (2011). *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulčních schopností v povodí Rakovnického potoka*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Praha. ISBN 978-80-87402-14-6.
- Jandora, J. et al. (2002). *Hydraulika a hydrologie*. CERM, Brno. ISBN 8021422041.
- Jaroš, F. (1994). *Pravděpodobnost a statistika*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha. ISBN 80-7080-208-1.
- Jenčík, J. (1998). Ultrazvukové průtokoměry. *Automatizace*, 41(5): 300–303.
- Jůva, K. et al. (1984). *Malé vodní toky*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Kaňok, J. (1997). *Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodí Odry po profil Kozle*. Ostravská univerzita, Ostrava
- Kašpárek, L. a Kožin, R. (2022). Změny srážek a odtoků na povodích v ČR v období intenzivního oteplování. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 64(2). ISSN 03228916.
- Kemel, M. (2000). *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vydavatelství ČVUT, Praha. Dotisk 1. vydání. ISBN 80-01-01456-8.
- Kender, J. ed. *Teoretické a praktické aspekty ekologie krajiny*. Ministerstvo životního prostředí, Praha. ISBN 80-7212-148-0.
- Kliment, Z. a Matoušková, M. (2005). *Trendy ve vývoji odtoku v povodí Otavy*. Geografie – Sborník ČGS, 112, 1, 32–45.
- Kliment, Z. et al. (2011). *Hodnocení trendů v hydro-klimatických řadách na příkladu vybraných horských povodí*. In: Sborn. Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Skalní mlýn, 4.2. 2011. ISBN 978-80-86690-87-2.
- Kolář, M. (2018). *Historická analýza vývoje land use ve vybraném území*. Diplomová práce, Jihočeský univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta zemědělská.
- Kopáček, J. a Bednář J. (2005). *Jak vzniká počasí*. Karolinum, Praha. ISBN 80-246-1002-7.
-

-
- 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.
- Kříž, H. (1983). *Hydrologie podzemních vod: vysokoškolská učebnice pro studenty přírodovědeckých fakult vysokých škol*. Academia, Praha.
- 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. (2006). *Zemědělské meliorace*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice. ISBN 80-7040-858-8.
- Kvítek, T. (2013). Nedávné povodně, současná sucha a retence vody. *Vodní hospodářství*, 63(12): 423–424.
- Lamačová, A. et al. (2011). *Future and recent changes in flow patterns in the Czech headwater catchments*. *Bodenkultur*. 62. 17-22.
- Langhammer, J. a Bernsteinová, J. (2020). *Which Aspects of Hydrological Regime in Mid-Latitude Montane Basins Are Affected by Climate Change?* *Water*. 12(8). ISSN 2073-4441.
- Lokoč, R a Lokočová, M. (2010). *Vývoj krajiny v České republice*. Lipka – školské zařízení pro environmentální vzdělávání, Brno. ISBN 978-80-904807-3-5.
- Mattas, D. (2014). *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha. ISBN 978-80-87402-27-6.
- Míko, L. a Hošek, M. (2009). *Příroda a krajina České republiky: Zpráva o stavu 2009*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha. ISBN 978-80-87051-70-2.
- Netopil, R. (1981). *Fyzická geografie I: Hydrologie, Limnologie, Oceánografie*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha.
- Němec, J. (1965). *Hydrologie*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Patočka, C. (1956). *Základy hydrologie pro zemědělce a lesníky*. Státní zemědělské 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.
- Pelikán, V. et al. (1988). *Hydrogeologická měření*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Pytl, V. (2004). *Příručka pro provozovatele čistírny odpadních vod*. Medim, Líbeznice u Prahy. ISBN 80-239-2528-8.
- Quitt, E. (1971). *Klimatické oblasti Československa*. Academia, Praha.
- Roub, R. a Pech, P. (2003). *Hydraulika: příklady*. Credit, Praha. ISBN 80-213-1059-6.
- Růžička, K. (1962). *Vodní hospodářství: Určeno vodohospodářům a posl. vys. škol vodohospodářského směru*. 2. přepracované vydání. SNTL, Praha.
- Seger, J. (1993). *Statistické metody v ekonomii*. H & H, Jinočany. ISBN 80-85787-26-1.
- Smakhtin, V. U. (2001). *Low flow hydrology: a review*. *Journal of Hydrology*. 240, 147-186.
- Sommer, M. (1985). *Hydrologie*. 3. vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Soukup, M. a Hrádek, F. (1999). *Optimální regulace povrchového odtoku z povodí*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha. ISSN 1211-3972.
- Starý, M. (2005). *Hydrologie (MODUL 01, 02): skripta*. VUT v Brně – Fakulta stavební, Brno.
- Šilar, J. (1996). *Hydrologie v životním prostředí*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Ostrava. ISBN 80-7078-361-3.
- Šlezinger, M. (2006). *Říční typy: úvod do problematiky úprav toků*. CERM, Brno. ISBN 80-7204-481-8.
- Tlapák, V. et al. (1992). *Voda v zemědělské krajině*. Zemědělské nakladatelství Brázda ve spolupráci s MŽP ČR, Praha. ISBN 80-209-0232-5.
- Trizna, M. (2004). *Klimageografie a hydrogeografie*. Geo-grafika, Bratislava. ISBN 8096814672.

Váša, J. et al. (1982). *Význam hydrologie pro rozvoj národního hospodářství*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Votruba, L. a Broža V. (1980). *Hospodaření s vodou v nádržích*. 2. přeprac. vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Žalud, Z. (2015). *Bioklimatologie*. Mendelova univerzita v Brně, Brno. ISBN 978-80-7509-189-5.

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.

Internetové informační zdroje

Cenia (2023) Česká informační agentura životního prostředí. [online] [29. 01. 2023]. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/>

CLMS (2023) Copernicus Land Monitoring Service [online] [18. 03. 2023]. <https://land.copernicus.eu>

Český hydrometeorologický ústav. (2010). *Runoff Processes: International Edition*. Portál ČHMI [online]. [01. 02. 2023]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/index.htm

ČHMÚ (2023) Český hydrometeorologický ústav. [online] [29. 01. 2023]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/>

ČÚZK (2023) Česká úřad zeměměřický a katastrální [online] [22. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/>

Pars-aqua.cz (2009). *Odborný článek o měření průtoků*. [online] [22. 11. 2022]. Dostupné z: <https://pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html>

Ruda, A. (2014). *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele*. Masarykova univerzita, Brno. [online] [12. 02. 2023]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/index.html

Tarboton, D. G. (2003). *Rainfall – runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes Web module*. [online] [29. 01. 2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265265983_rainfall-runoff_processes

VÚMOP (2023) Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy [online] [18. 03. 2023]. Dostupné z: <https://mapy.vumop.cz/>

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Složky přímého odtoku vody (chmi.cz, 2023)	13
Obrázek 1.2: Znázornění srážko-odtokového procesu (Starý, 2005)	14
Obrázek 1.3: Automaticky sklopné nádoby (Bumerl, 2003)	17
Obrázek 1.4: Thomsonův přeliv (pars-aqua.cz, 2022).....	18
Obrázek 1.5: Cippolettiho přeliv (fiedler.company/cs, 2022).....	19
Obrázek 1.6: Pohled na Parshallův žlab (cdn.bitrix24.eu, 2022)	20
Obrázek 1.7: Podélný řez Parshallovým žlabem (cdn.bitrix24.eu, 2022).....	20
Obrázek 1.8: Venturiho žlab (papay.sk, 2022).....	21
Obrázek 1.9: Podélný řez Venturiho žlabu (Bartušek, 1985)	21
Obrázek 1.10: Hydrometrická vrtule (cksvv.vuv.cz, 2022).....	22
Obrázek 1.11: Ultrazvukové měření pomocí Dopplerova jevu (researchgate.net, 2022)	24
Obrázek 1.12: Ultrazvukové měření průtoku (pars-aqua.cz, 2022).....	24
Obrázek 1.13: Vodočetná lať (d34-a.sdn.cz, 2022).....	25
Obrázek 1.14: Konsumpční křivka (wikimedia.org, 2022).....	26
Obrázek 1.15: Graf hustoty pravděpodobnosti (Brázdil, 1989).....	27
Obrázek 1.16: Graf empirické čáry pravděpodobnosti překročení (is.muni.cz, 2022)	29
Obrázek 2.17: Mapa zobrazující jednotlivá povodí a meteorologické stanice (ČHMÚ, zpracování vlastní)	41
Obrázek 2.18: Mapa klimatických oblastí (Quitt, 1971; zpracování vlastní)	42
Obrázek 3.19: Land use 1990 (Corine, zpracování vlastní).....	43
Obrázek 3.20: Land use 2018 (Corine, zpracování vlastní).....	44
Obrázek 3.21: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Hamerského potoka za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	46

Obrázek 3.22: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Hamerského potoka za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	46
Obrázek 3.23: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Mže za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	47
Obrázek 3.24: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Mže za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	47
Obrázek 3.25: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Berounky za období 1981-1990 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	48
Obrázek 3.26: Graf podvojně součtové čáry pro povodí Berounky za období 2012-2021 (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	48
Obrázek 3.27: Graf regresní přímky pro povodí Hamerského potoka (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	53
Obrázek 3.28: Graf regresní přímky pro povodí Mže (ČHMÚ, zpracování vlastní)	53
Obrázek 3.29: Graf regresní přímky pro povodí Berounky (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	54

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Klimatické charakteristiky povodí Hamerského potoka (Quitt, 1971; zpracování vlastní).....	35
Tabulka 2.2: Klimatické charakteristiky povodí Mže (Quitt, 1971; zpracování vlastní).....	37
Tabulka 2.3: Klimatické charakteristiky povodí Berounky (Quitt, 1971; zpracování vlastní).....	39
Tabulka 3.4: Porovnání plochy land use v roce 1990 a 2018 (zpracování vlastní)...	45
Tabulka 3.5: Koeficienty odtoku pro povodí Hamerského potoka (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	50
Tabulka 3.6: Koeficienty odtoku pro povodí Mže (ČHMÚ, zpracování vlastní)	51
Tabulka 3.7: Koeficienty odtoku pro povodí Berounky (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	52
Tabulka 3.8 Souhrnná tabulka regresních analýz (zpracování vlastní)	55
Tabulka 3.9: Vyhodnocení časové řady 1981-1990 pomocí Mann-Kendallova testu (ČHMÚ, zpracování vlastní)	55
Tabulka 3.10: Vyhodnocení časové řady 2012-2021 pomocí Mann-Kendallova testu (ČHMÚ, zpracování vlastní)	55
Tabulka 3.11: Výsledky dvouvýběrového t-testu (ČHMÚ, zpracování vlastní).....	57