



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

ANALÝZA HYDROLOGICKÉ ČASOVÉ ŘADY PRO VYBRANÉ POVODÍ ŘEKY MORAVY

HYDROLOGICAL TIME SERIES ANALYSIS FOR CHOSEN SUB CATCHMENT
IN MORAVA RIVER BASIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Černý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Vojtěch Černý
Název	Analýza hydrologické časové řady pro vybrané povodí řeky Moravy
Vedoucí práce	doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

STARÝ, M. Hydrologie (MODUL 01), VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2005.

CIPRA, T. Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii, Praha 1986, SNTL

WU, J.; WANG, Z.; DONG, Z.; TANG, Q.; LV, X.; DONG, G. Analysis of Natural Streamflow Variation and Its Influential Factors on the Yellow River from 1957 to 2010. Water 2018, 10, 1155.

WANG, X.; ENGEL, B.; YUAN, X.; YUAN, P. Variation Analysis of Streamflows from 1956 to 2016 Along the Yellow River, China. Water 2018, 10, 1231.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Současné klimatické podmínky vyvolávají otázky jaký vliv má klimatický vývoj a klimatická změna na hydrologický režim České republiky. Hlavní otázky jsou: i) Je klimatická změna vážná a její průběh je již hmatatelný, nebo jde jen o přirozenou variabilitu systému? ii) Dochází k výrazné, až skokové změně klimatických podmínek? iii) Jaký vliv má klimatická změna na hydrologické podmínky v povodí? iv) Začínají se v hydrologických řadách projevat nestacionární tendence vyvolané klimatickou změnou? Cílem práce je provést základní analýzu časové průtokové řady a odhadnout její možné změny. Praktická aplikace bude provedena na časové řadě průtoků měřených v měrném profilu Dalečín v povodí řeky Svratky.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Současné klimatické podmínky vyvolávají otázky, jaký vliv má klimatický vývoj a klimatická změna na hydrologický režim povodí České republiky. Hlavní otázky jsou: I) Je klimatická změna vážná a její průběh v hydrologických řadách je již hmatatelný? II) Dochází k výrazné, až skokové změně klimatických podmínek potažmo průtoků v říční síti? III) Jaký vliv má klimatická změna na hydrologické podmínky v povodí? IV) Začínají se v hydrologických řadách projevovat nestacionární tendence vyvolané klimatickou změnou? Cílem práce je provést základní analýzu časové průtokové řady a odhadnout její možné změny. Analýza bude provedena pomocí autokorelační funkce, spektrální hustoty, metody klouzavých průměrů, statistických charakteristik, empirické čáry pravděpodobnosti překročení a v neposlední řadě i pomocí dekompozice časové řady. Praktická aplikace je provedena na časové řadě průměrných měsíčních průtoků stanovených v měrném profilu Dalečín v povodí řeky Svratky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Autokorelační funkce, dekompozice, hydrologická časová řada, klouzavé průměry, průtok, spektrální hustota, statistické charakteristiky

ABSTRACT

Current climate conditions raise questions about how climate change should affect the hydrological regime of the Czech Republic. The main questions are: I) Is climate change serious and is it already tangible in hydrological series? II) Are there significant changes in the climatic conditions, or in the flow of the river network? III) How does climate change affect hydrological conditions in the catchment? IV) Are there non-stationary tendencies in the hydrological series caused by climate change? The aim of this work was to perform a basic analysis of hydrological time series and estimated its possible changes. The analysis was done with using autocorrelation function, spectral density, moving averages methods, statistical characteristics, empirical line of probability of exceeding and last but not least by decomposing the time series. The practical application was applied on time series of average monthly flows determined in the hydrometric profile of Dalečín in the Svratka river basin.

KEY WORDS

Autocorrelation function, decomposition, hydrological time series, moving averages, flow, spectral density, statistical characteristics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Vojtěch Černý *Analýza hydrologické časové řady pro vybrané povodí řeky Moravy*. Brno, 2019. 46 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Analýza hydrologické časové řady pro vybrané povodí řeky Moravy* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 5. 2019

Vojtěch Černý
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

1	ÚVOD	1
1.1	ČHMÚ	2
1.2	VÚV TGM.....	2
1.3	IPCC.....	2
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	4
2.1	Zahraniční výzkum	4
3	CÍL PRÁCE	5
4	METODA	6
4.1	Stacionární a nestacionární procesy.....	6
4.2	Statistické charakteristiky	6
4.2.1	Aritmetický průměr	6
4.2.2	Směrodatná odchylka a disperze (rozptyl).....	6
4.2.3	Koeficient variace	7
4.2.4	Koeficient asymetrie (šikmosti).....	7
4.2.5	Minimum, maximum a medián	8
4.3	Empirická čára pravděpodobnosti překročení	8
4.4	Autokorelační funkce.....	8
4.5	Spektrální hustota	9
4.6	Dekompozice hydrologických řad	10
4.6.1	Trendová složka – T_t	10
4.6.2	Sezónní (periodická) složka – S_t	10
4.6.3	Cyklická složka – C_t	10
4.6.4	Reziduální složka – E_t	11
4.7	Metoda klouzavých průměrů	11
4.8	Jednoduchý přístup k sezónní složce.....	12
5	PRAKTICKÁ APLIKACE	13
5.1	Zjednodušující předpoklady	13
5.2	Hlásný profil a zájmové území	13
5.3	Analýza ročních průtoků.....	14
5.3.1	Autokorelační funkce	15
5.3.2	Spektrální hustota.....	15
5.3.3	Trendová složka	16
5.4	Analýza měsíčních průtoků	16

5.4.1	Statistické charakteristiky	17
5.4.2	Empirická čára pravděpodobnosti překročení.....	21
5.4.3	Autokorelační funkce	23
5.4.4	Spektrální hustota.....	24
5.4.5	Trendová složka	24
6	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ	29
6.1	Roční průtoky	29
6.2	Měsíční průtoky	30
6.2.1	Vybrané statistické charakteristiky	30
6.2.2	Autokorelační funkce a spektrální hustota	33
6.2.3	Trendová složka	33
6.3	Nestacionární procesy měsíčních průtoků	34
6.3.1	Aritmetický průměr	34
6.3.2	Maximální hodnoty	35
6.3.3	Minimální hodnoty.....	36
6.3.4	Sezónní složka.....	37
7	ZÁVĚR	40
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	41
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	43
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	44
11	SEZNAM TABULEK.....	46

1 ÚVOD

Počátky lidské civilizace jsou odedávna spjaté s vodou. Právě samotná voda byla hybnou silou v našich dějinách. Začít můžeme již u prvních vyspělejších civilizací, kterými byli například Sumerové, Babyloňané, Egypťané, Číňané a další. Tyto civilizace se rozvíjely odlišně, avšak jedno měly společné, nacházely se blízko vodních zdrojů. Například Sumerové v okolí řek Eufrat a Tigris, Egypťané u řeky Nil. Zdroj vody byl, je a bude vždy tím nejdůležitějším pro lidstvo. Zmiňovanou závislost lidí na vodě dokládají historické monumentální stavby, jako jsou například starověké důmyslné závlahové systémy a římské akvadukty. Tyto stavby svou velikostí a technickým řešením zdůrazňují váhu, která byla vodě v minulosti přikládána [10].

I v současnosti je voda stále tím nejdůležitějším. Voda je hojně využívána k osobní potřebě lidí, k závlahám, k rekreaci, jako průmyslová voda a k mnoha dalším účelům. V poslední letech se pomyslné nůžky mezi hydrologickými extrémami (povodně a suchá období) stále více rozvírají. Na jedné straně čelíme extrémním povodním (1997, 2005) a na druhé straně se musíme vypořádávat s výrazným suchem, které je pozorováno již od roku 2014 až dodnes. Stále častější výskyt hydrologických extrémů je spojován s klimatickou změnou [12].

Klimatická změna je ve společnosti velmi rozporuplným tématem. Někteří popírají antropogenní vliv na klima Země, jiní zase popisují vlivy člověka na změnu klimatu. O vlivu člověka na změnu klimatu hovoří například Evropská agentura pro životní prostředí. Zmíněná organizace vidí antropogenní vliv například ve zvyšování množství skleníkových plynů, které vznikají při spalování fosilních paliv [19]. V současné době je vědecký konsenzus takový, že 97 % odborníků považuje klimatickou změnu za reálnou [20].

Současná problematika sucha není z historického hlediska novinkou, protože výrazně suchá období se v minulosti již několikrát vyskytla, například v letech 1540, 1904 nebo 1947 [11].

Otázkou je, co můžeme udělat? Odpovědí je adaptovat se, tak jako to dělali naši předkové. Voda okolo nás podléhá určitému koloběhu. Velký koloběh vody začíná srážkou, která se transformuje na povrchový odtok. Ten se pak mění na koncentrovaný odtok v korytech řek, které vodu dopraví do moří. Z moří se voda vypařuje a uzavírá tak celý koloběh vody. Výskyt srážek jen těžko ovlivníme, proto je třeba se zaměřit na znalost chodu průtoků v korytech řek. Právě voda tekoucí v řekách plní vodárenské, závlahové, rekreační a další nádrže.

Abychom mohli efektivně pracovat s průtoky v korytech řek a vhodně hospodařit s vodou v nádržích, je potřeba blíže prozkoumat samotné chování průtokových řad, respektive znát vnitřní strukturu průtokové řady z pohledu časového vývoje. K tomuto účelu se využívají nástroje analýzy časových řad, které se snaží odpovědět na otázky: Vyskytuje se u těchto řad periodické chování? Podléhají tyto průtoky nějakým změnám? Podobných otázek je celá řada a je nutné na ně najít odpovědi.

Jak již bylo zmíněno, prvním krokem je analýza průtokových řad, která umožní hlubší porozumění časovým průtokovým řadám. Čím více budeme mít informací o vývoji

časové řady, tím snazší pro nás bude adaptace na změny v hydrologickém režimu. Hlubší porozumění umožní lepší předpovídání průtokových řad. Optimistickou zprávou je, že i na klimatickou změnu se lze adaptovat, ať na ní lidé věří nebo ne.

Otázkami ohledně změny klimatu a analýzy průtokových řad se zabývají některé organizace v České republice a samozřejmě i organizace v zahraničí. Pohled některých organizací na budoucí vývoj klimatu je popsán v dílčích podkapitolách.

1.1 ČHMÚ

Český hydrometeorologický ústav patří k nejznámějším organizacím v České republice, které se zabývají klimatologií, meteorologií a hydrologií. Téma bakalářské práce je spjaté s hydrologií, proto bude dále popisováno pouze hydrologické hledisko.

Český hydrometeorologický ústav se zabývá provozováním měřících stanic, vlastním měřením daných veličin, zpracováním a vyhodnocováním naměřených dat. Z poslední dostupné ročenky (2017) vyplývají pro oblast povrchových vod závěry zmíněné v dalším odstavci [12].

Rok 2017 byl na většině území ČR podprůměrný, také předešlé roky 2015 a 2016 byly hodnoceny jako podprůměrné, avšak na celém území ČR [13], [14]. Hodnoty průměrných měsíčních průtoků se celoročně pohybovaly pod dlouhodobými průměry. Rok 2017 patřil k málo vodným rokům, jak již bylo zmíněno. Málo vodné roky jsou pozorovány již od roku 2014 [12].

1.2 VÚV TGM

Výzkumný ústav vodohospodářský Tomáše Garrigua Masaryka je další organizací, která se zabývá hydrologií, která je jedním z několika odborů v rámci celého ústavu. Také Výzkumný ústav vodohospodářský se zabývá zpracováním hydrologických dat, hydrologickou bilancí, klimatickou změnou a dalšími tématy.

V publikaci zpracované Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, která popisuje klimatickou změnu a vodní zdroje povodí Vltavy, je popsán fakt, že dochází k zvyšování teplot, které má následný vliv na zvýšení výparu. Průměrná roční výška odtoku by se s klimatickou změnou měla snižovat. V publikaci je také zmíněna myšlenka, že pokud by průtoky klesaly, pak by mohl nastat problém, že by průtoky nedosahovaly minimálních zůstatkových hodnot stanovených vodoprávními úřady [15].

1.3 IPCC

Mezivládní panel pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change) je celosvětová vědecká organizace, která zkoumá a vyhodnocuje celosvětové změny klimatu. Tato organizace pravidelně vydává hodnotící zprávy, zatím nejaktuálnější je pátá hodnotící zpráva AR5 (The Fifth Assessment Report) [16].

Ve zprávě lze najít prokazatelné výsledky o vývoji klimatu jako například: oteplování klimatického systému, pokles množství sněhu a ledu, růst koncentrace skleníkových plynů. V části, která se věnuje koloběhu vody je zmíněno, že rozdíly mezi suchými a vlhkými obdobími se budou prohlubovat. K prohlubování rozdílů bude docházet také mezi vlhkými a suchými oblastmi, avšak mohou se najít výjimky. Ve zprávě je popsán také fakt, že se pravděpodobně s rostoucí teplotou bude zvyšovat výskyt extrémních srážek nad pevninou ve středních zeměpisných šířkách [16].

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V hydrologii jsou pro analýzu časových průtokových řad standardně využívány statistické charakteristiky (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, medián, disperze...), empirická čára pravděpodobnosti překročení, autokorelační funkce, spektrální hustota pro hledání skrytých period, pro rozbor trendu se běžně využívá metoda klouzavých průměrů. Také dekompozice hydrologických časových řad je standardně využívána pro snazší práci s těmito řadami. Tyto metody popisuje například Starý v [1].

V hydrologii se často setkáváme s problematikou stacionarity a nestacionarity časových hydrologických řad. Touto problematikou se zabývá například Nacházel v [17]. V úvodní kapitole byly popsány vybrané organizace zabývající se změnou klimatu a analýzou průtokových řad, také byly zmíněny jejich poznatky ohledně budoucího vývoje klimatu. V následující kapitole 2.1 je popsán příklad zahraničního výzkumu spjatého s tématem této práce.

2.1 Zahraniční výzkum

Výzkum chování Žluté řeky je příkladem zahraniční analýzy hydrologické průtokové řady. V rámci tohoto výzkumu byla zkoumána již zmíněná Žlutá řeka, též známá jako Chuang Che, anglicky Yellow River. Plocha povodí Žluté řeky je 795 000 km². Celková délka toku je 5364 km [3], [4].

K analýze byla využívána časová řada ročních průtoků z deseti hydrologických stanic. V rámci studie byl například sledován trend časových řad a byla provedena analýza bodových změn. K analýze trendu byla využita metoda lineární regrese, metoda Mann-Kendall a další. Jednou z metod pro identifikaci bodu zlomu byla například metoda Lee-Heghinian. K analýze byly využity také statistické charakteristiky, konkrétně průměr a koeficient variace [4].

Ze studie vyšel závěr, že průtoková řada má klesající tendenci a také byla identifikována bodová změna (bod zlomu). Změny v chování průtokové řady přisuzují lidské činnosti, zejména vysokým užíváním vody a provozováním velkých nádrží [4].

Metody použité v bakalářské práci se standardně využívají v praxi pro analýzu hydrologických časových řad u nás v České republice, ale také v zahraničí. Nejčastěji jsou pochopitelně využívány základní statistické charakteristiky.

3 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo provést základní analýzu časové průtokové řady a odhadnout její možné změny v průběhu zkoumaného období. Podkladem pro zpracování praktické aplikace byla časová řada měsíčních průtoků v délce 66 let. Časová průtoková řada pochází z měrného profilu Dalečín v povodí řeky Svratky.

4 METODA

4.1 Stacionární a nestacionární procesy

Stacionárním procesem se rozumí proces, který se v čase nemění a jeho popisující veličiny jsou v čase konstantní [1]. O stacionaritě píše Nacházel [17, str. 8]: „*Stacionarita náhodných procesů patří k nejdůležitějším předpokladům řešení většiny vodohospodářských úloh. Zpravidla se nuceně přijímá pro omezené pozorování hydrologických veličin a praktickou nemožnost posoudit v krátkých časových řadách dlouhodobé nestacionární tendence.*“ Opačným jevem je proces nestacionární, u kterého popisující veličiny nejsou v čase konstantní. Proces se stává nestacionárním, pokud již jedna veličina není v čase konstantní [1].

4.2 Statistické charakteristiky

Statistické charakteristiky jsou v hydrologii používány pro popis souborů dat. Tyto charakteristiky vypovídají o tvaru hustoty pravděpodobnosti. Hustota pravděpodobnosti je závislost sledované veličiny a pravděpodobnosti výskytu této veličiny. Mezi nejčastější statistické charakteristiky patří aritmetický průměr, směrodatná odchylka, disperze (rozptyl), koeficient variace, koeficient asymetrie (špičatosti). Starý popisuje v [1] a [5] statistické charakteristiky pomocí základní dvojice metod, a to metody momentů a metody kvantilů. V práci je pro stanovení statistických charakteristik základního souboru použita metoda momentů. Statistické charakteristiky byly stanoveny pro každý kalendářní měsíc v roce samostatně. Dalšími statistickými charakteristikami jsou minimální, maximální hodnota a medián.

4.2.1 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr patří k základním statistickým charakteristikám. Hodnota aritmetického průměru leží v intervalu mezi minimální a maximální hodnotou veličiny daného souboru dat. Výpočet dle metody momentů je uveden ve vztahu (1).

$$\bar{Q}_m = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}}{n}, \quad (1)$$

kde:

\bar{Q}_m aritmetický průměr průtoků daného měsíce,

$Q_{m,i}$ průměrný průtok v daném měsíci v roce i ,

n počet roků sledování.

4.2.2 Směrodatná odchylka a disperze (rozptyl)

Směrodatná odchylka je definována jako odmocnina z disperze. Pokud se rozptyl blíží svou hodnotou nule, graf hustoty pravděpodobnosti je špičatý a úzký. S rostoucí hodnotou

rozptylu se graf hustoty pravděpodobnosti stává plošším. Metodou momentů je směrodatná odchylka a rozptyl vyjádřen vztahem (2).

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

kde:

$s(Q_m)$ směrodatná odchylka průtoků daného měsíce,

$D(Q_m)$ rozptyl průtoků daného měsíce,

\bar{Q}_m aritmetický průměr průtoků daného měsíce,

$Q_{m,i}$ průměrný průtok v daném měsíci v roce i ,

n počet roků sledování.

4.2.3 Koeficient variace

Koeficient variace je vyjádřen jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Využívá se k porovnávání souborů s odlišnou úrovní dat.

$$C_v(Q_m) = \frac{s(Q_m)}{\bar{Q}_m} \quad (3)$$

kde:

$C_v(Q_m)$ koeficient variace průtoků daného měsíce,

$s(Q_m)$ směrodatná odchylka průtoků daného měsíce,

\bar{Q}_m aritmetický průměr průtoků daného měsíce.

4.2.4 Koeficient asymetrie (šikmosti)

Koeficient asymetrie popisuje Starý [1, str. 135]: „*Koeficient asymetrie $C_{s,x}$ vyjadřuje míru asymetrie jevů okolo aritmetického průměru.*“ Je-li koeficient asymetrie roven nule, graf hustoty pravděpodobnosti je symetrický. Nabývá-li koeficient asymetrie záporné hodnoty, graf se naklání doprava, naopak při kladné hodnotě doleva, viz obrázek 4.2-1.

$$C_s(Q_m) = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{(n-1) \cdot (C_v(Q_m))^3} \quad \text{pro } K_i = \frac{Q_{m,i}}{\bar{Q}_m} \quad (4)$$

kde:

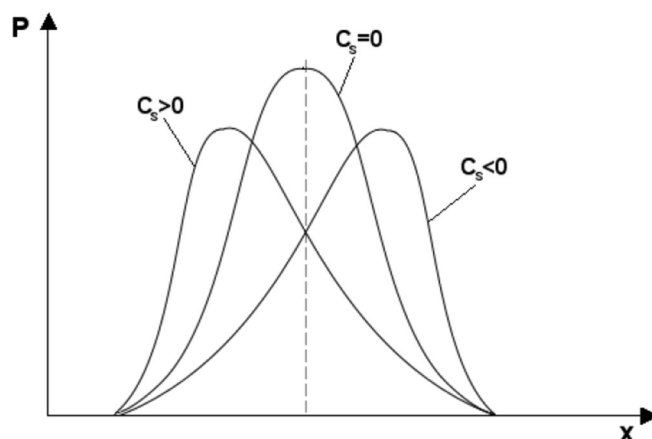
$C_s(Q_m)$ koeficient asymetrie průtoků daného měsíce,

$C_v(Q_m)$ koeficient variace průtoků daného měsíce,

\bar{Q}_m aritmetický průměr průtoků daného měsíce,

$Q_{m,i}$ průměrný průtok v daném měsíci v roce i ,

n počet roků sledování.



Obr. 4.2-1 Závislost naklonění grafu hustoty pravděpodobnosti na hodnotě koeficientu asymetrie [1]

4.2.5 Minimum, maximum a medián

Minimum je nejnižší hodnota veličiny v daném souboru dat, naopak maximum je nejvyšší hodnota veličiny. Medián je hodnota, která dělí vzestupně nebo sestupně seřazenou řadu dat na dvě poloviny o stejném počtu prvků. V případě sudého počtu prvků je medián průměrem dvou prostředních hodnot seřazené řady dat.

4.3 Empirická čára pravděpodobnosti překročení

Pro stanovení empirické čáry pravděpodobnosti je nutno soubor dat seřadit od nejvyšší po nejnižší hodnotu, první hodnota je tedy nejvyšší. Každé hodnotě přiřadíme pravděpodobnost překročení, kterou vypočteme ze vztahu (5) podle Čegodajeva. Každou hodnotu a její příslušnou pravděpodobnost vyneseme v pravoúhlém systému. Empirická čára pravděpodobnosti překročení vznikne proložením bodů křivkou [5].

$$P_i = \frac{i-0,3}{n+0,4} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kde:

i pořadí hodnoty v seřazené řadě,

n celkový počet hodnot v souboru.

4.4 Autokorelační funkce

Autokorelační funkce (samokorelační funkce) je speciálním typem korelační funkce. V praxi ji lze využít například při hledání závislosti zkoumané veličiny na svých předchozích hodnotách nebo při analýze periodického chování časové řady. V případě autokorelační funkce by se průtoková řada libovolného měrného profilu porovnávala s průtokovou řadou toho samého profilu. V případě korelační funkce, by se porovnávala průtoková řada libovolného měrného profilu s průtokovou řadou jiného profilu, kterým by mohl být profil v jiné části toku, nebo profil na jiném toku [1], [5].

Počet posunů souborů dat vůči sobě určuje řád autokorelační funkce. Koeficient korelace nabývá hodnot v intervalu $<-1, 1>$. Znakem autokorelační funkce je poznatek, že při nultém posunu je hodnota koeficientu korelace rovna jedné. Výpočet korelačního koeficientu je vyjádřen vztahem (6), schematizace vstupních souborů je znázorněna na Obr. 4.4-1 [1], [5].

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{pro } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (6)$$

kde:

$r(\tau)$ koeficient korelace,

τ počet posunů, řád autokorelační funkce,

X_i, Y_i prvky souboru X, Y,

n počet prvků souboru X, počet prvků souboru Y.

X		Y	
X_i	=	Q_{i+1}	Y_i = Q_i
X_{i+1}	=	Q_{i+2}	Y_{i+1} = Q_{i+1}
X_{i+2}	=	Q_{i+3}	Y_{i+2} = Q_{i+2}
X_{i+3}	=	Q_{i+4}	Y_{i+3} = Q_{i+3}
X_{i+4}	=	Q_{i+5}	Y_{i+4} = Q_{i+4}

Obr. 4.4-1 Schéma vytvoření vstupů z průtokové řady pro výpočet autokorelační funkce prvního řádu (posun průtoků o jeden řádek)

4.5 Spektrální hustota

Spektrální hustota je výsledkem Fourierovy transformace autokorelační funkce. Spektrální hustota slouží k nalezení skrytých period časových řad. Spektrální hustotu popisuje Starý [1, str. 159]: „Na délku a význam skrytých period se usuzuje podle polohy extrémů a jejich velikosti na této funkci.“ Ve vztahu (7) lze vidět výpočet spektrální hustoty Fourierovou transformací autokorelační funkce [1], [5].

$$S(T) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ 1 + 2 \cdot \left[\sum_{\tau=1}^m \left(1 - \frac{\tau}{m+1} \right) \cdot r(\tau) \cdot \cos \frac{2\pi\tau}{T} \right] \right\} \quad (7)$$

kde:

$S(T)$ spektrální hustota,

T délka periody,

$r(\tau)$ koeficient korelace,

τ počet posunů, řád autokorelační funkce,

m celkový počet kroků autokorelační funkce.

4.6 Dekompozice hydrologických řad

Analýza hydrologických řad je jedna z hlavních činností v hydrologii. Pro snazší pochopení těchto řad je vhodné řady dělit na jednotlivé složky. Hydrologickou řadu lze rozdělit na složku trendovou, periodickou, cyklickou a reziduální. Podle vzájemného vztahu mezi jednotlivými složkami se hydrologické řady dělí na řady s aditivní dekompozicí nebo na řady s multiplikativní dekompozicí. V případě aditivní dekompozice jsou jednotlivé složky v součtovém tvaru dle vztahu (8). Při multiplikativní dekompozici se hodnota veličiny rovná součinu jednotlivých složek dle vztahu (9). V následujících čtyřech kapitolách budou dle [2], [1] popsány již zmíněné složky hydrologických řad.

$$y_t = T_t + S_t + C_t + E_t \quad (8)$$

$$y_t = T_t \cdot S_t \cdot C_t \cdot E_t \quad (9)$$

kde:

y_t sledovaná hydrologická veličina (např. průtok),

T_t trendová složka,

S_t sezónní složka,

C_t cyklická složka,

E_t reziduální složka.

4.6.1 Trendová složka – T_t

Trendová složka charakterizuje dlouhodobý vývoj hydrologické řady. Jednou z metod pro stanovení trendové složky je metoda klouzavých průměrů, která bude popsána v samostatné kapitole 4.7.

4.6.2 Sezónní (periodická) složka – S_t

Pro tuto složku jsou charakteristické změny během jednoho kalendářního roku. Tyto změny mohou být způsobeny např. sezónními vlivy. U průtokové řady to může v praxi znamenat zvýšené průtoky po jarním tání nebo nižší průtoky v letním teplém období. Stanovení sezónní složky bude popsáno v kapitole 4.8.

4.6.3 Cyklická složka – C_t

Stanovení cyklické složky je obtížné. Tato složka způsobuje kolísání okolo složky trendové. Na rozdíl od složky sezónní, která má stále stejnou délku periody, se délka periody cyklické složky v čase mění.

4.6.4 Reziduální složka – E_t

Reziduální složka je zbytkem časové řady po odstranění tří předchozích složek (periodická, sezónní, cyklická). V reziduální složce mohou být zahrnuty například chyby v měření nebo zaokrouhlování.

4.7 Metoda klouzavých průměrů

Metoda klouzavých průměrů patří k metodám, kterými lze stanovit trendovou složku. Při výpočtu trendové složky touto metodou je nutné určit délku a řád klouzavého průměru. Délkou klouzavého průměru se rozumí délka skrytých period, která plyne z výpočtu spektrální hustoty (viz 4.5). Řád klouzavého průměru popisuje Cipra [2, str. 48]: „Obvykle se rozhodujeme na základě subjektivního posouzení charakteru dat s tím, že preferujeme jednoduché průměry co nejnižšího řádu...“ V tabulce 4.7-1 jsou vypsány váhy klouzavých průměrů s lichou délkou skrytých period, váhy klouzavých průměrů jsou symetrické podle prostřední hodnoty [2]. O klouzavých průměrech se sudou délkou skrytých period píše Cipra [2, str. 45]: „Další poznámka se týká případu, že bychom chtěli k vyrovnání řady polynomem používat úsek se sudým počtem $2m$ členů. Vyrovnaná hodnota by pak vždy patřila doprostřed časového intervalu mezi okamžiky původních pozorování, což je nevýhodné např. vzhledem k interpretaci výsledků.“

Tab. 4.7-1 Váhy klouzavých průměrů [2]

Délka	Řád	
	2. a 3.	4. a 5.
3	(0, 1, 0)	(0, 1, 0)
5	$\frac{1}{35}(-3, 12, 17, \dots)$	(0, 0, 1, ...)
7	$\frac{1}{21}(-2, 3, 6, 7, \dots)$	$\frac{1}{231}(5, -30, 75, 131, \dots)$
9	$\frac{1}{231}(-21, 14, 39, 54, 59, \dots)$	$\frac{1}{429}(15, -55, 30, 135, 179, \dots)$
11	$\frac{1}{429}(-36, 9, 44, 69, 84, 89, \dots)$	$\frac{1}{429}(18, -45, -10, 60, 120, 143, \dots)$
13	$\frac{1}{143}(-11, 0, 9, 16, 21, 24, 25, \dots)$	$\frac{1}{2431}(110, -198, -135, 110, 390, 600, 677, \dots)$

Vzorec pro klouzavý průměr 2. řádu, délky 5 na příkladu trendové složky průtokové řady je uveden ve vztahu (10).

$$T_i = (-3 \cdot Q_{i-2} + 12 \cdot Q_{i-1} + 17 \cdot Q_i + 12 \cdot Q_{i+1} - 3 \cdot Q_{i+2}) \quad (10)$$

Další možností pro výpočet klouzavého průměru je vztah (11), který popisuje Starý [5, str. 52]: „... pro vyhlazení v hydrologii osvědčený “binomický filtr“ délky 5, který řadíme mezi jednoduché klouzavé průměry.“

$$T_i = (Q_{i-2} + 4 \cdot Q_{i-1} + 6 \cdot Q_i + 4 \cdot Q_{i+1} + Q_{i+2}) \quad (11)$$

4.8 Jednoduchý přístup k sezónní složce

Sezónní složka je jednou ze čtyř složek, ze kterých se skládají hydrologické řady. V této kapitole bude popsán jednoduchý přístup, jak stanovit sezónní složku dle [2, str. 78]. Tento postup byl využit pro zkoumanou řadu měsíčních průtoků.

Prvním krokem je stanovení klouzavého průměru průtokové řady. Délku a řád klouzavého průměru zvolíme podle pravidel popsanych v předchozí kapitole. Vypočtené klouzavé průměry považujeme za odhad součtu trendové a cyklické složky. Druhým krokem je výpočet složky sezónní a reziduální. Podle vztahu (8), kde je vidět rovnice hydrologické řady s aditivní dekompozicí, provedeme výpočet součtu složky sezónní a reziduální. Výpočet se řídí vztahem (12) a je prostý, stačí od původní řady odečíst vypočtený klouzavý průměr, kterým jsme v první kroku odhadli součet složky trendové a cyklické. Výsledkem druhého kroku je součet složky sezónní a reziduální.

$$(S_t + E_t) = y_t - (T_t + C_t) \quad (12)$$

V třetím kroku si vyfiltrujeme předchozí výpočty podle kalendářních měsíců. Požadovanou sezónní složku vypočítáme zprůměrováním všech hodnot součtů složky sezónní a reziduální vždy pro každý kalendářní měsíc zvlášť. Tímto zprůměrováním by se měl potlačit vliv reziduální složky a výsledkem je sezónní složka, která má v čase konstantní hodnotu pro každý z dvanácti měsíců v roce.

Touto metodou získáme číselné hodnoty součtu složky trendové a cyklické. Dále získáme číselné hodnoty složky sezónní, která je v čase konstantní pro každý měsíc, jak bylo zmíněno v předchozím odstavci. Číselné hodnoty složky reziduální lze získat podle vztahu (13).

$$E_t = y_t - (T_t + C_t) - S_t \quad (13)$$

5 PRAKTICKÁ APLIKACE

Vstupní data pro analýzu tvoří průtoková řada v měsíčním kroku, řada začíná lednovým průtokem v roce 1950 a končí prosincovým průtokem v roce 2015. Průtoková řada pochází z hlásného profilu Dalečín. Tento profil a zájmové území je popsán v následující kapitole.

Praktická aplikace je členěná do čtyřech kapitol, v první kapitole jsou vypsané zjednodušující předpoklady, které byly využity při analýze průtokové řady. Druhá kapitola se věnuje zájmovému území a hlásnému profilu Dalečín, z kterého pochází naměřená data. V třetí kapitole byla provedena analýza ročních průtoků, ve čtvrté kapitole byly analyzovány průtoky měsíční. K analýze byly využity statistické charakteristiky, autokorelační funkce, spektrální hustota, metoda klouzavých průměrů a další.

V této bakalářské práci byly také analyzovány nestacionární procesy v řadě měsíčních průtoků, výstupy této analýzy jsou uvedeny ve shrnutí výsledků, viz kapitola 6.3.

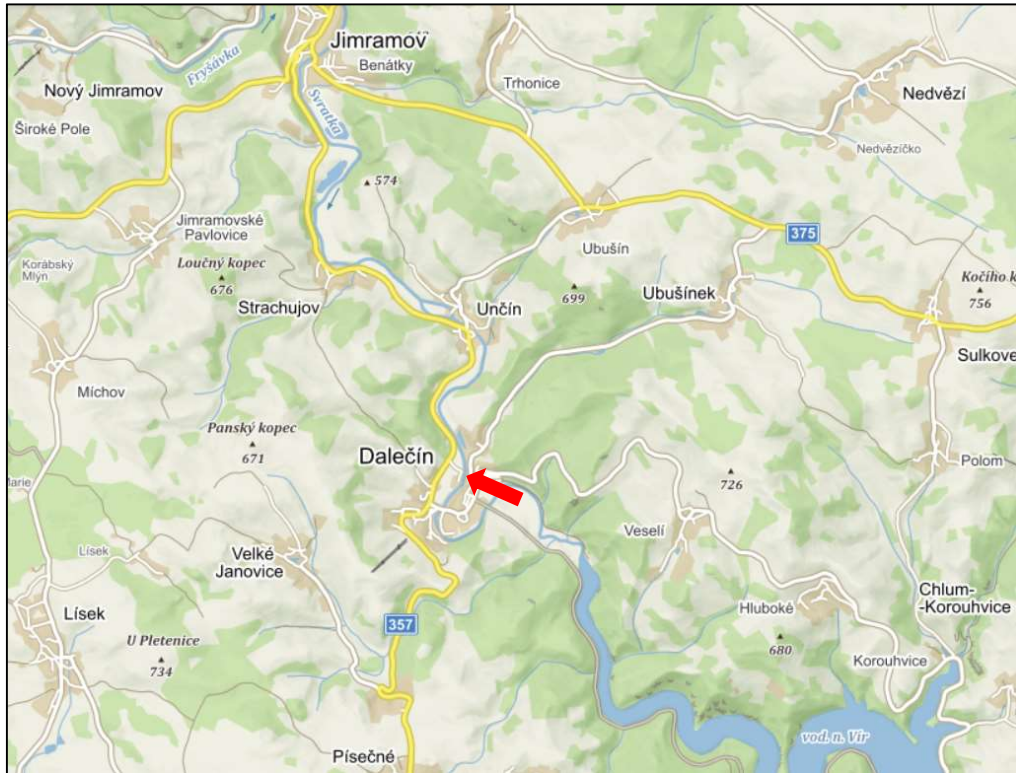
5.1 Zjednodušující předpoklady

- Metoda pro stanovení sezónní složky (kapitola 4.8), v literatuře popsaná pro multiplikativní dekompozici, byla využita pro průtokovou řadu s aditivní dekompozicí,
- byly vybrány klouzavé průměry pouze s lichou délkou,
- byl zvolen 2./3. řád klouzavých průměrů.

5.2 Hlásný profil a zájmové území

Jak již bylo zmíněno, data pochází z hlásného profilu Dalečín, číslo hydrologického pořadí tohoto profilu je 4-15-01-033. Hlásný profil se nachází na řece Svratce ve staničení 118,01 km. Zeměpisné souřadnice stanice jsou 16,245095 v. d. a 49,595102 s. š., provozovatelem stanice je Český hydrometeorologický úřad Brno. Nula vodočtu se nachází v nadmořské výšce 470,07 m n. m. Hodnoty významných průtoků se nachází v tabulkách 5.2-1 a 5.2-2. Dlouhodobý průměrný průtok Q_a je $3,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [6].

Profil Dalečín je uzávěrovým profilem zájmového povodí, zmíněný profil je vyznačen šipkou na mapě viz obrázek 5.2-1. Plocha zájmového povodí je $366,94 \text{ km}^2$. Toto povodí je vhodné pro analýzu z několika důvodů. Průtoková řada má dostatečnou délku a neobsahuje mezery v měření průtoků. Povodí nad vodoměrným profilem je považováno za hydrologicky čisté, tedy bez vodohospodářských nádrží. Právě manipulace se zadržovanou vodou v nádrži by mohla měnit charakter průtokové řady [6].



Obr. 5.2-1 Lokalizace hlásného profilu Dalečín na řece Svatce [7]

Pod hlásným profilem se na řece Svatce nachází vodní nádrže Vír I a Vír II. Povodí řeky Svatky je povodí řeky 4. řádu. Hlavním povodím Svatky je povodí Dunaje.

Tab. 5.2-1 Hodnoty N-letých průtoků (hlásný profil Dalečín) [6]

N-leté průtoky:	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
[m ³ ·s ⁻¹]	34	61	78	130	160

Tab. 5.2-2 Hodnoty m-denních průtoků (hlásný profil Dalečín) [8]

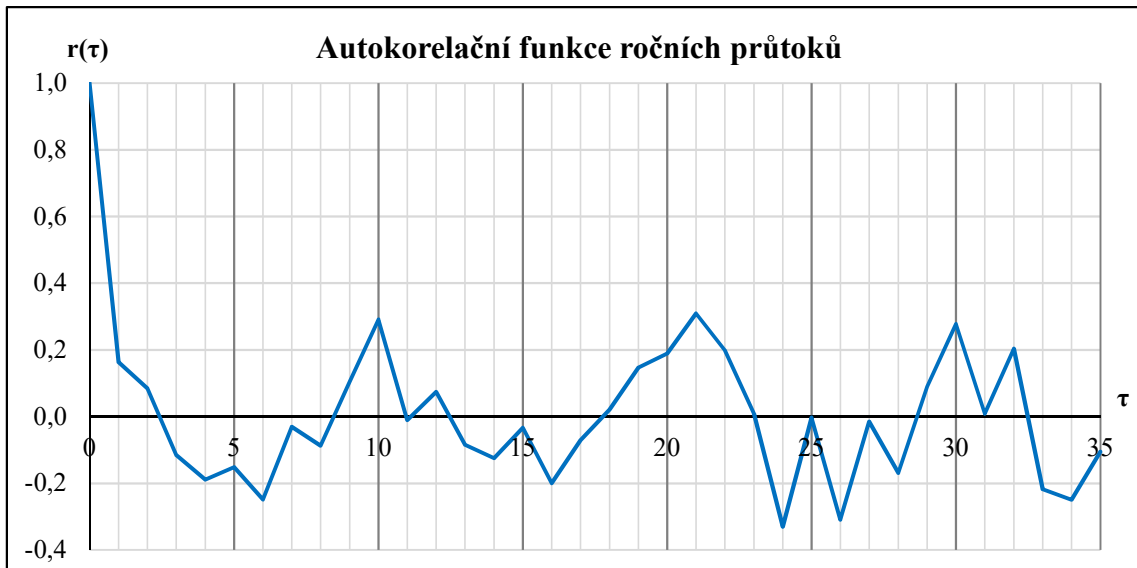
m-denní průtoky:	Q _{30d}	Q _{90d}	Q _{180d}	Q _{270d}	Q _{330d}	Q _{355d}	Q _{364d}
[m ³ ·s ⁻¹]	7,94	3,84	2,06	1,15	0,66	0,44	0,27

5.3 Analýza ročních průtoků

Zprůměrováním řady měsíčních průtoků z hlásného profilu Dalečín vznikla hydrologická řada ročních průtoků, pro kterou byla provedena základní analýza průtoků. Roční průtoková řada byla analyzována s využitím autokorelační funkce, spektrální hustoty a metody klouzavých průměrů.

5.3.1 Autokorelační funkce

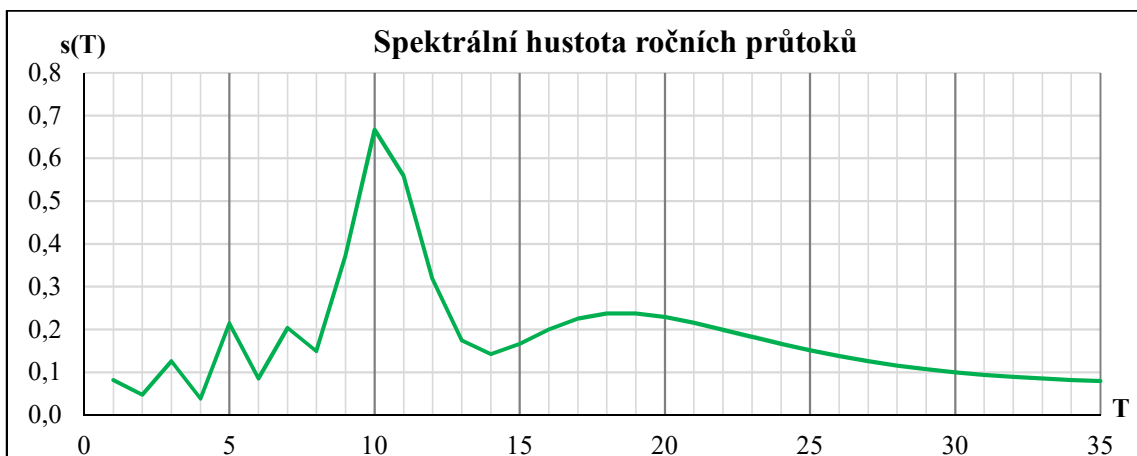
Autokorelační funkce byla stanovena dle vztahu (6), z vypočtených hodnot byl sestaven graf na obrázku 5.3-1. V grafu autokorelační funkce lze vidět lokální extrémy, které se objevují převážně u posunů násobku deseti. Hodnoty lokálních extrémů se pohybují přibližně okolo hodnoty 0,3.



Obr. 5.3-1 Autokorelační funkce ročních průtoků

5.3.2 Spektrální hustota

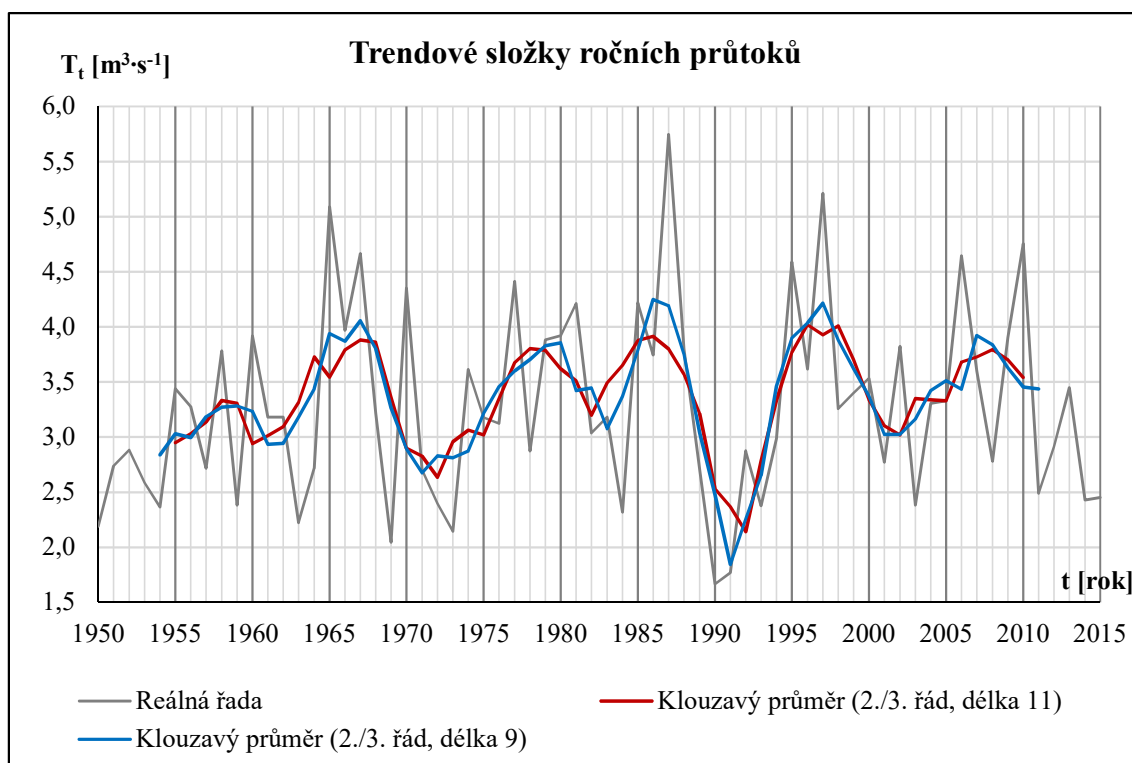
Fourierovou transformací autokorelační funkce byly spočteny hodnoty spektrální hustoty a sestaven graf viz obrázek 5.3-2. V grafu je zřejmý globální extrém v bodě $T = 10$.



Obr. 5.3-2 Spektrální hustota ročních průtoků

5.3.3 Trendová složka

Ke stanovení trendu byla využita metoda klouzavých průměrů. Přestože ze spektrální hustoty vychází nejsilnější délka skrytých period 10, byly k bližšímu zkoumání vybrány klouzavé průměry délek 9 a 11, protože klouzavé průměry sudé délky jsou nevýhodné, jak je popsáno v kapitole 4.7. Byl zvolen 2./3. řád klouzavých průměrů též dle kapitoly 4.7. Výpočetní vztahy se řídí tabulkou 4.7-1 podle dané délky a řádu klouzavého průměru.



Obr. 5.3-3 Trendové složky ročních průtoků

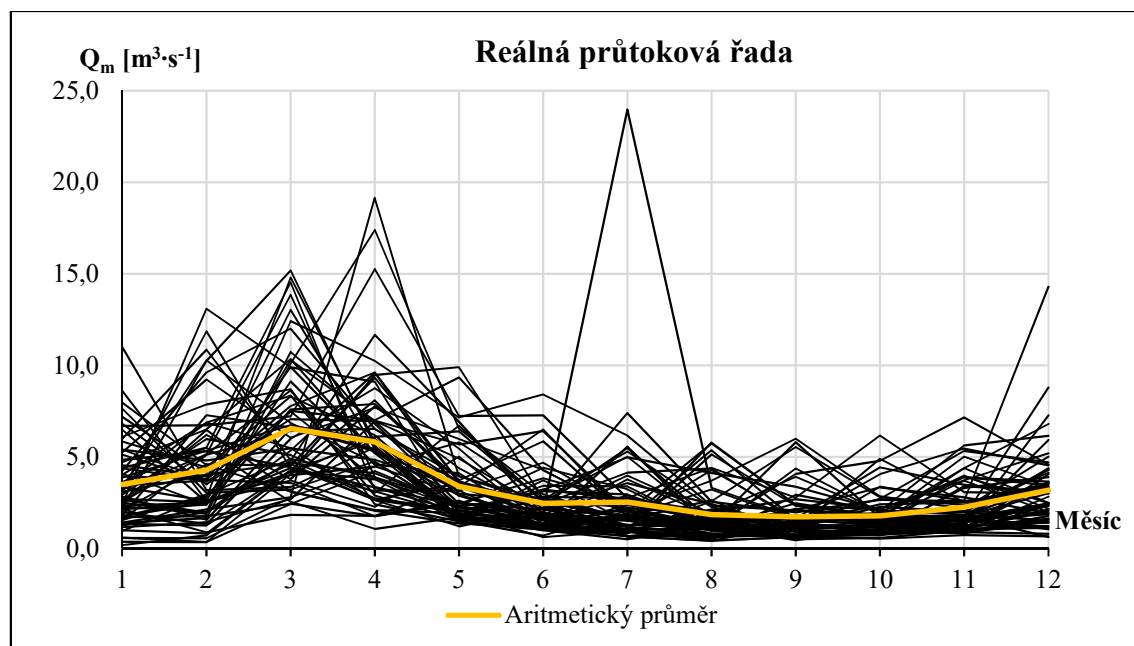
Výsledným reprezentativním klouzavým průměrem pro popis řady ročních průtoků je klouzavý průměr délky 11, protože dosahuje vyšších hodnot ve spektrální hustotě oproti klouzavému průměru délky 9.

V grafické závislosti trendu ročních průtoků (klouzavý průměr délky 11) na obrázku 5.3-3 lze vidět výskyt lokálních extrémů. Významná lokální maxima trendu se nalézají v letech 1958, 1967, 1978, 1986, 1996, 1998, 2008. Naopak lokální minima trendu jsou v letech 1960, 1972, 1982, 1992, 2002.

5.4 Analýza měsíčních průtoků

V předchozí kapitole byly popsány roční průtoky, v této kapitole budou blíže prozkoumány měsíční průtoky, jejich závislosti a chování. Na obrázku 5.4-1 jsou znázorněny roční průběhy měsíčních průtoků seskládané v jeden graf s vyznačeným aritmetickým průměrem průtoků v roční řadě. Analýza byla zpracována s využitím statistických charakteristik, empirické čáry pravděpodobnosti překročení, autokorelační

funkce, spektrální hustoty, metody klouzavých průměrů a dekompozice hydrologických řad.



Obr. 5.4-1 Reálná průtoková řada seskládaná po jednotlivých rocích

5.4.1 Statistické charakteristiky

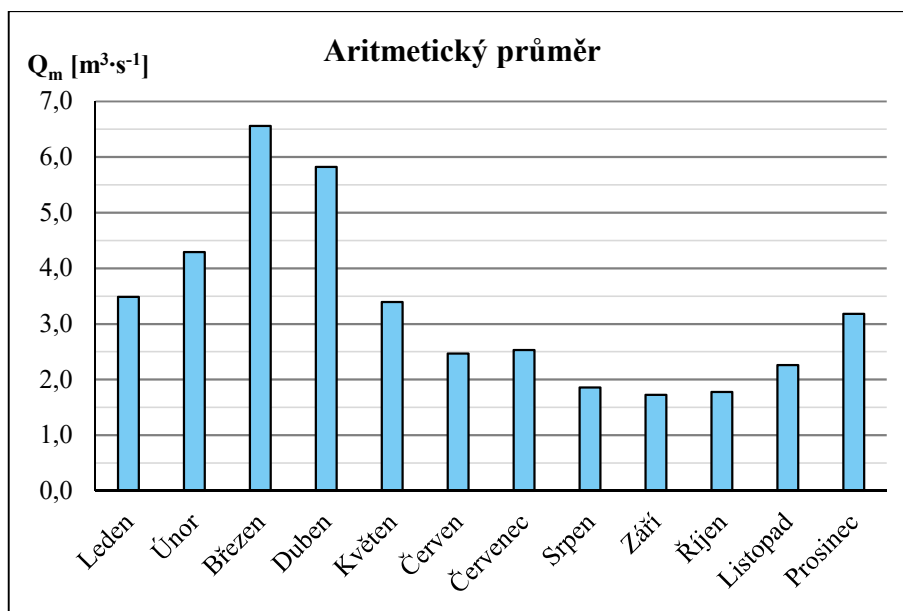
Statistické charakteristiky byly stanoveny metodou momentů pro každý kalendářní měsíc samostatně podle vztahů uvedených v kapitole 4.2. Výsledné hodnoty aritmetického průměru, disperze, směrodatné odchylky, koeficientu variace, koeficientu asymetrie jsou uvedeny v tabulce 5.4-1 a budou dále popsány v samostatných kapitolách.

Tab. 5.4-1 Statistické charakteristiky (Metoda momentů)

	Průměr [m ³ ·s ⁻¹]	Disperze [m ⁶ ·s ⁻²]	Směrodatná odchylka [m ³ ·s ⁻¹]	Koeficient variace [-]	Koeficient asymetrie [-]	Medián [m ³ ·s ⁻¹]
Leden	3,488	4,878	2,209	0,633	0,988	3,012
Únor	4,291	8,589	2,931	0,683	1,042	3,722
Březen	6,558	11,285	3,359	0,512	0,905	5,738
Duben	5,820	12,155	3,486	0,599	1,658	5,340
Květen	3,394	3,918	1,979	0,583	1,331	2,888
Červen	2,466	2,571	1,603	0,650	1,748	2,039
Červenec	2,534	9,424	3,070	1,211	5,329	1,751
Srpen	1,855	1,828	1,352	0,729	1,472	1,342
Září	1,726	1,531	1,237	0,717	1,867	1,362
Říjen	1,780	1,234	1,111	0,624	1,875	1,488
Listopad	2,261	2,015	1,420	0,628	1,310	1,740
Prosinec	3,182	4,587	2,142	0,673	2,515	2,664

5.4.1.1 Aritmetický průměr

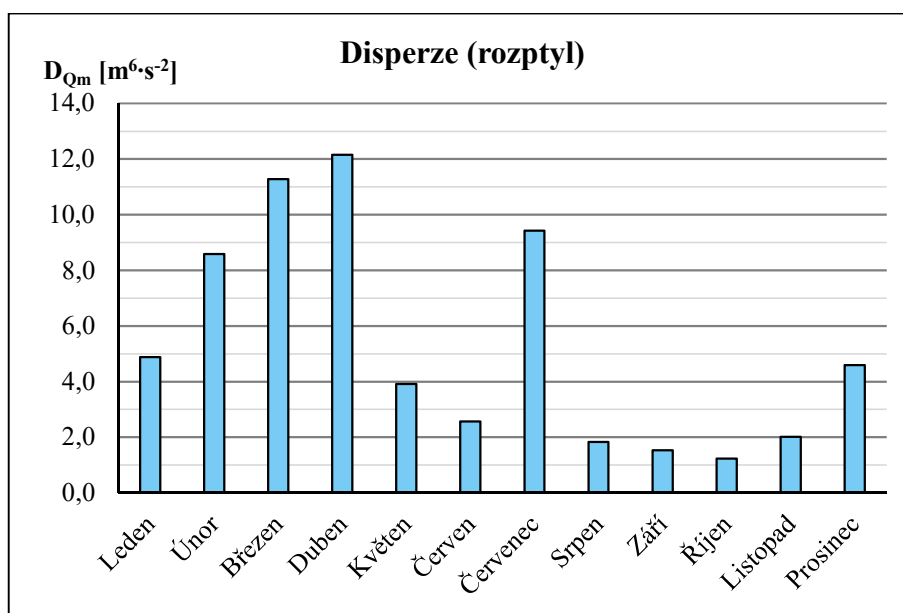
Z vypočtených hodnot aritmetických průměrů byl sestaven graf na obrázku 5.4-2. Hodnoty aritmetického průměru narůstají od začátku roku až do března, poté začínají klesat až do července, u kterého je mírný nárůst. Od zvýšené hodnoty v červenci dochází k opětovnému poklesu až do září. Od září hodnoty aritmetického průměru měsíčních průtoků narůstají.



Obr. 5.4-2 Aritmetické průměry měsíčních průtoků

5.4.1.2 Disperze (rozptyl) a směrodatná odchylka

Z hydrologických výpočtů a z obrázku 5.4-3 je zřejmé že největší disperzi mají měsíce únor, březen, duben a červenec. Vysoké hodnoty disperze znamenají velké rozptýlení hodnot průtoků od průměrné hodnoty.



Obr. 5.4-3 Disperze (rozptyly) měsíčních průtoků

Jednou z příčin vysoké disperze v červenci byl výskyt regionálních povodní právě v červenci roku 1997. V tomto roce byl červencový průtok více jak devítinásobkem průměrné hodnoty. Při těchto povodních byla zasažena především Morava a východní Čechy. Povodně si vyžádaly desítky obětí a způsobily škody v řádech desítek miliard korun českých. Tyto povodně zasáhly i sousední státy, nejvíce Polsko a Rakousko [9].

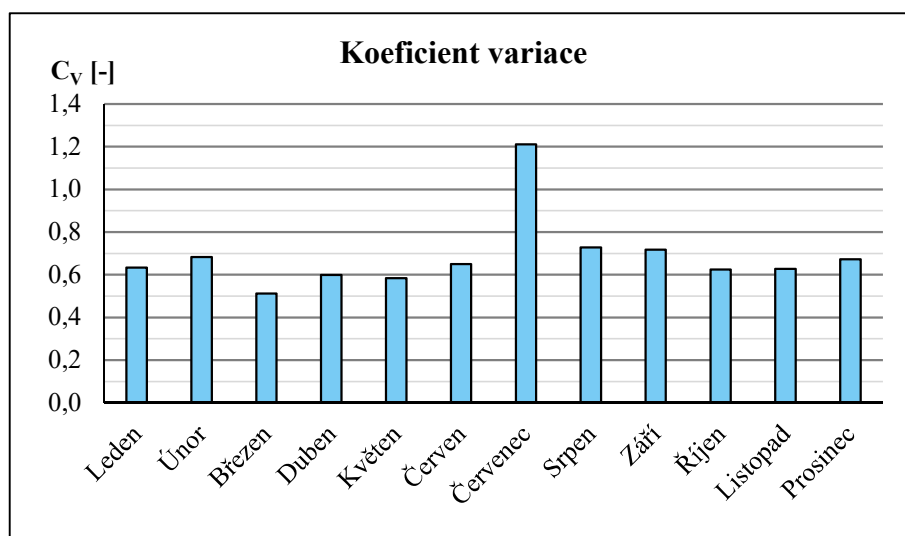
Směrodatná odchylka je graficky znázorněna na obrázku 5.4-4. Hodnoty směrodatné odchylky vychází přímo z disperze, proto průběh této veličiny a výskyt extrémů je velmi podobný průběhu disperze.



Obr. 5.4-4 Směrodatné odchylky měsíčních průtoků

5.4.1.3 Koeficient variace

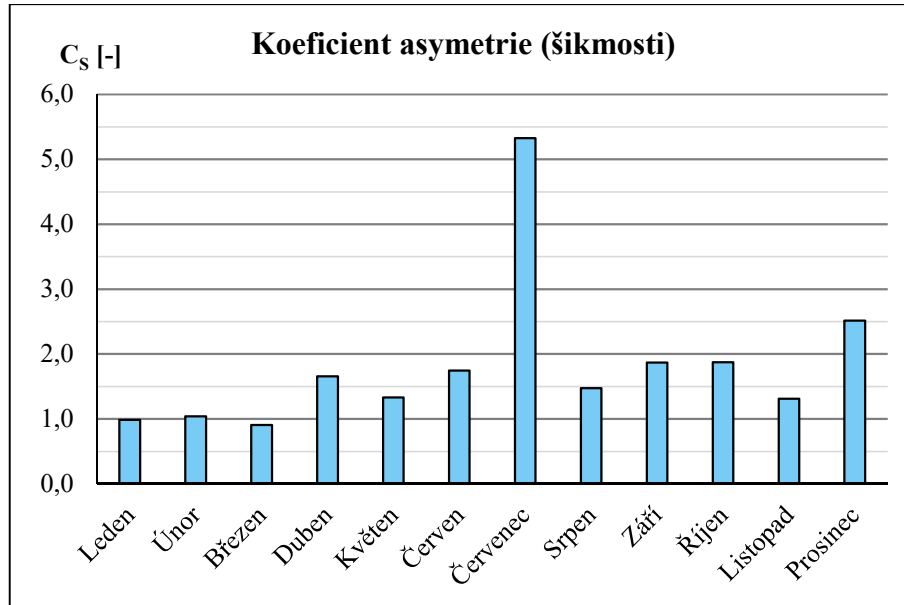
Hodnoty koeficienty variace (viz obrázek 5.4-5) se pohybují okolo hodnoty 0,6 až na červencovou, která ostatní hodnoty výrazně převyšuje. Tato vysoká hodnota je nejspíše opět důsledkem výskytu extrémního červencového průtoků v roce 1997.



Obr. 5.4-5 Koeficienty variace měsíčních průtoků

5.4.1.4 *Koeficient asymetrie (šikmosti)*

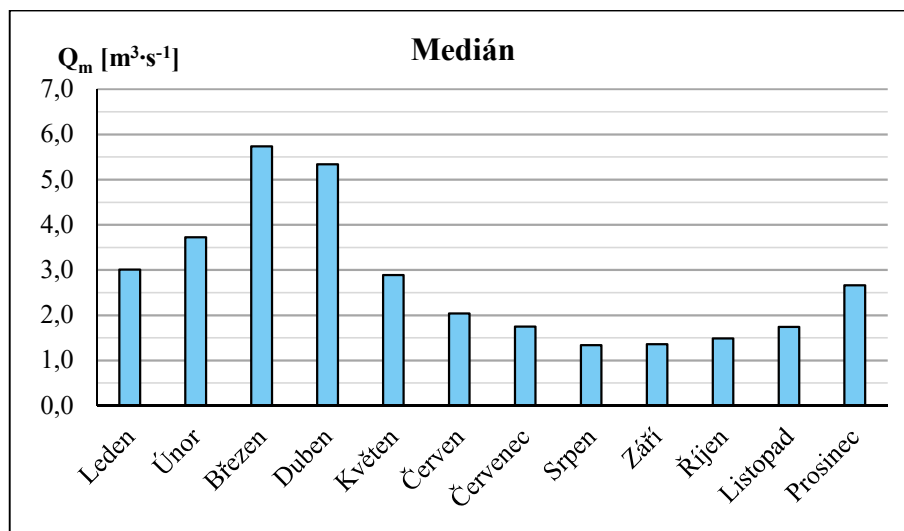
Koeficient asymetrie je graficky znázorněn na obrázku 5.4-6. Ve všech měsících nabývá koeficient asymetrie kladné hodnoty. Opakuje se výskyt extrému v červenci, příčina je totožná jako u předchozích statistických veličin.



Obr. 5.4-6 Koeficienty asymetrie (šikmosti) měsíčních průtoků

5.4.1.5 *Medián*

Medián je graficky znázorněn na obrázku 5.4-7. Hodnoty mediánu jsou velmi podobné hodnotám průměru, ve všech měsících jsou hodnoty mediánu nepatrně menší než aritmetický průměr.



Obr. 5.4-7 Mediány měsíčních průtoků

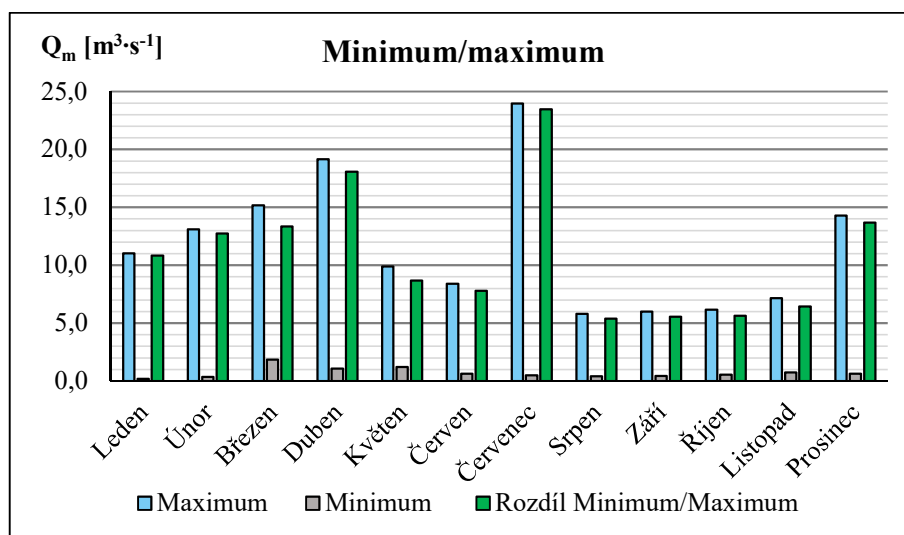
5.4.1.6 *Minimum, maximum*

Číselné hodnoty lze nalézt v tabulce 5.4-2, grafické znázornění na obrázku 5.4-8.

Tab. 5.4-2 Hodnoty minima a maxima

	Minimum [m ³ ·s ⁻¹]	Maximum [m ³ ·s ⁻¹]	Rozdíl Minimum/Maximum [m ³ ·s ⁻¹]
Leden	0,190	11,018	10,828
Únor	0,349	13,092	12,743
Březen	1,840	15,187	13,347
Duben	1,061	19,143	18,082
Květen	1,214	9,900	8,686
Červen	0,625	8,406	7,781
Červenec	0,505	23,967	23,462
Srpen	0,409	5,792	5,383
Září	0,440	5,990	5,550
Říjen	0,538	6,174	5,636
Listopad	0,729	7,161	6,432
Prosinec	0,632	14,301	13,669

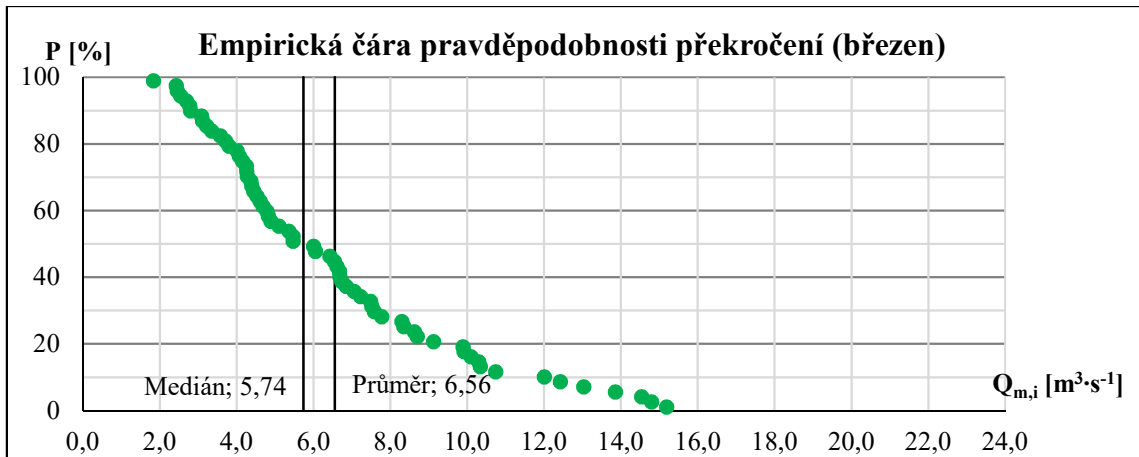
Největší maxima lze nalézt u měsíců březen, duben, červenec. Letní a podzimní měsíce, s výjimkou již popsaného července, dosahují relativně malých maximálních průtoků.



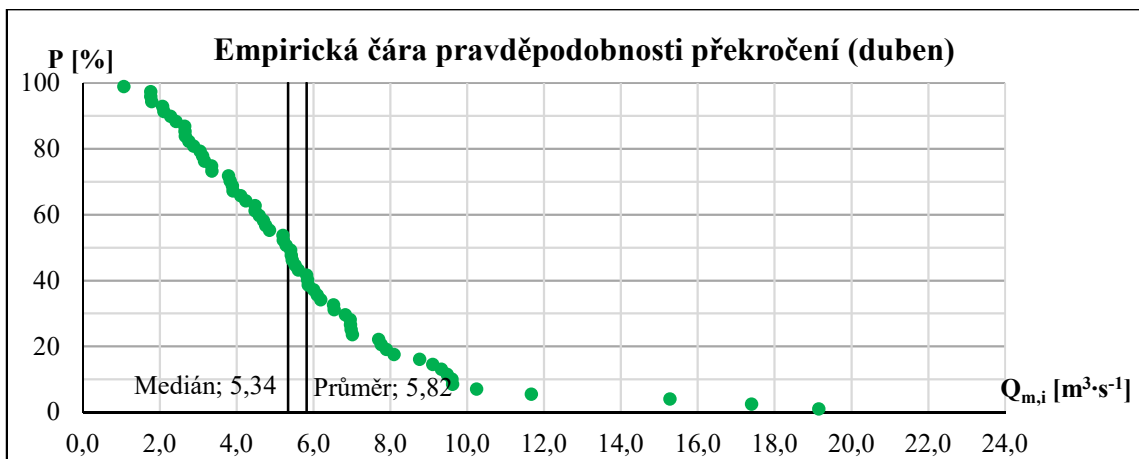
Obr. 5.4-8 Minimální a maximální hodnoty měsíčních průtoků, jejich rozdíly

5.4.2 Empirická čára pravděpodobnosti překročení

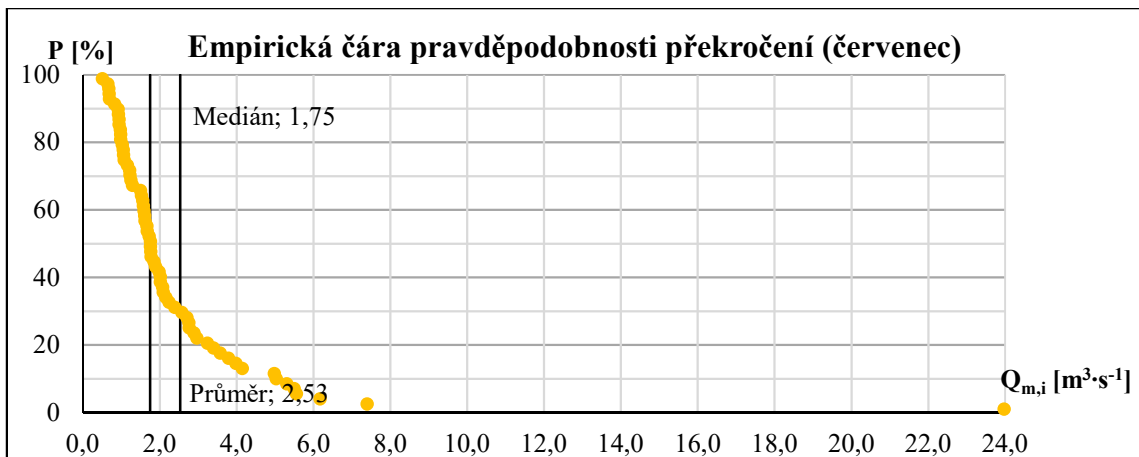
Pro každý měsíc byla sestavena empirická čára pravděpodobnosti překročení, viz obrázky 5.4-9 až 5.4-12. Pro demonstraci rozdílů mezi měsíci postačí uvést pouze empirické čáry překročení pro několik měsíců. Byly vybrány tři měsíce s nejvyšší disperzí (březen, duben, červenec) a pro porovnání říjen jako měsíc s nejnižší disperzí.



Obr. 5.4-9 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (březen)



Obr. 5.4-10 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (duben)



Obr. 5.4-11 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (červenec)

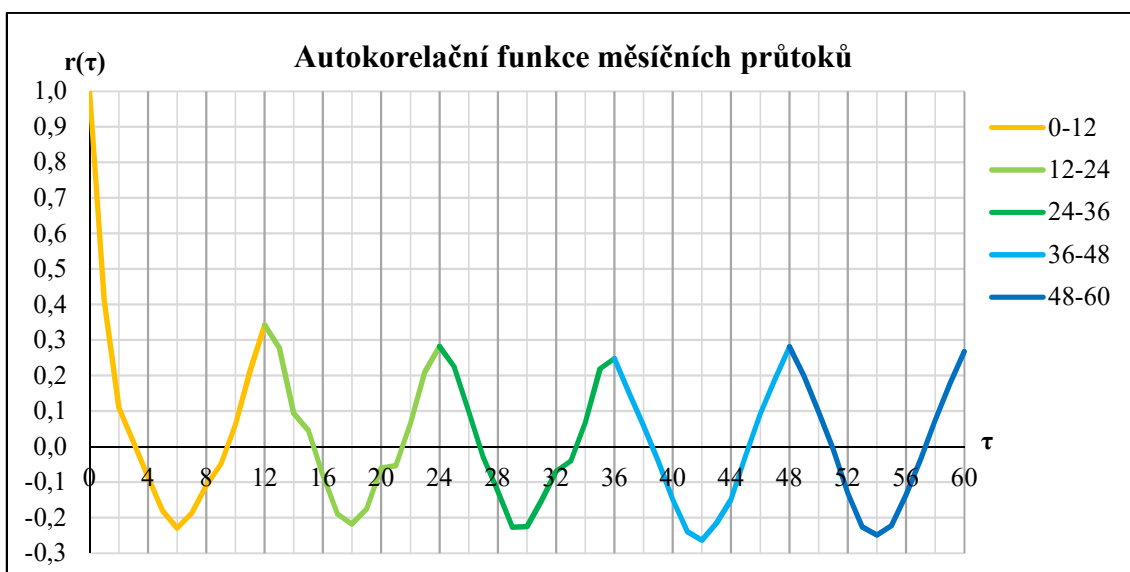


Obr. 5.4-12 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (říjen)

Březen, duben a červenec mají výrazně vychýlené hodnoty od mediánu, který řadu půlí na dvě stejně početné poloviny. Naopak u empirické čáry překročení října můžeme sledovat opačný jev, body jsou díky nízké disperzi velmi blízko průměrné hodnoty, respektive mediánu.

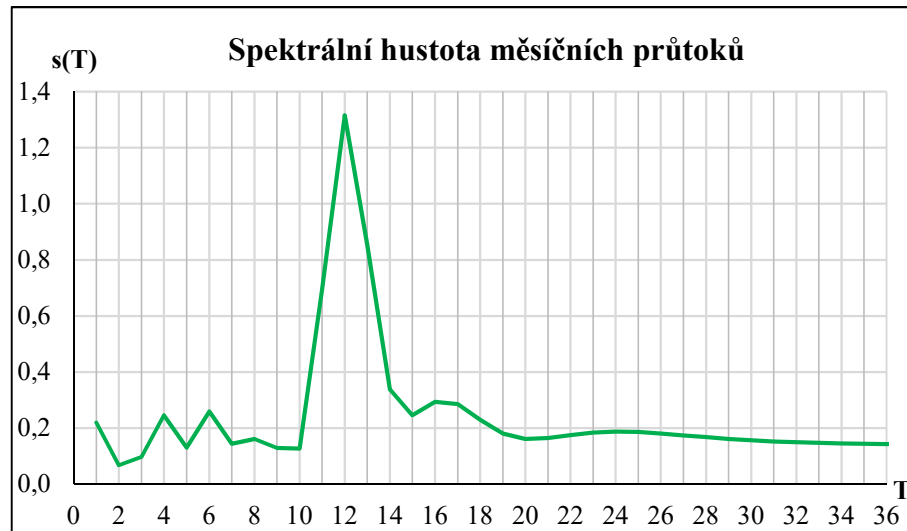
5.4.3 Autokorelační funkce

Autokorelační funkce měsíčních průtoků byla stanovena dle vztahu (6), stejně jako u průtoků ročních. Výsledky výpočtů jsou vyobrazeny v grafu na obrázku 5.4-13. Lokální maxima i minima autokorelační funkce se vyskytují pravidelně po dvanácti posunech. Barevné rozlišení úseků délky 12 má zdůrazňovat dvanáctiměsíční periodicitu autokorelační funkce. Jednotlivé úseky barevně odpovídají grafu 6.2-3 ve shrnutí výsledků. V prvním úseku klesá autokorelační funkce z typické hodnoty 1, po tomto klesání se ustaluje periodický průběh. Hodnoty autokorelační funkce nevybočují z pomyslných mezí $\langle -0,3; 0,4 \rangle$.



Obr. 5.4-13 Autokorelační funkce měsíčních průtoků

5.4.4 Spektrální hustota



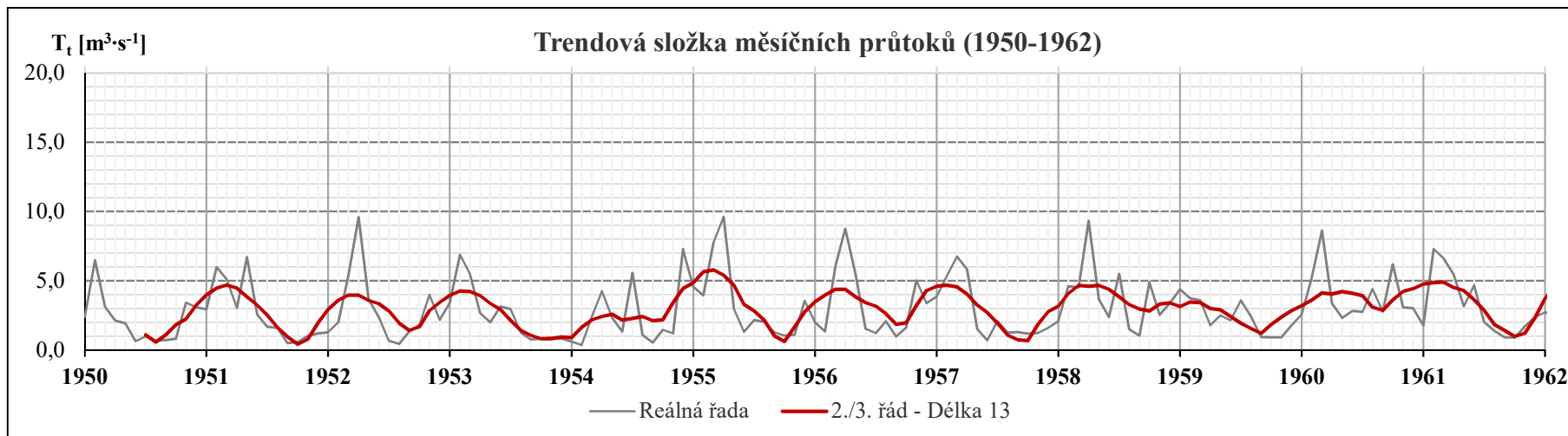
Obr. 5.4-14 Spektrální hustota měsíčních průtoků

Spektrální hustota vznikla Fourierovou transformací autokorelační funkce dle kapitoly 4.5. V grafu na obrázku 5.4-14 je výrazný globální extrém v hodnotě $T = 12$.

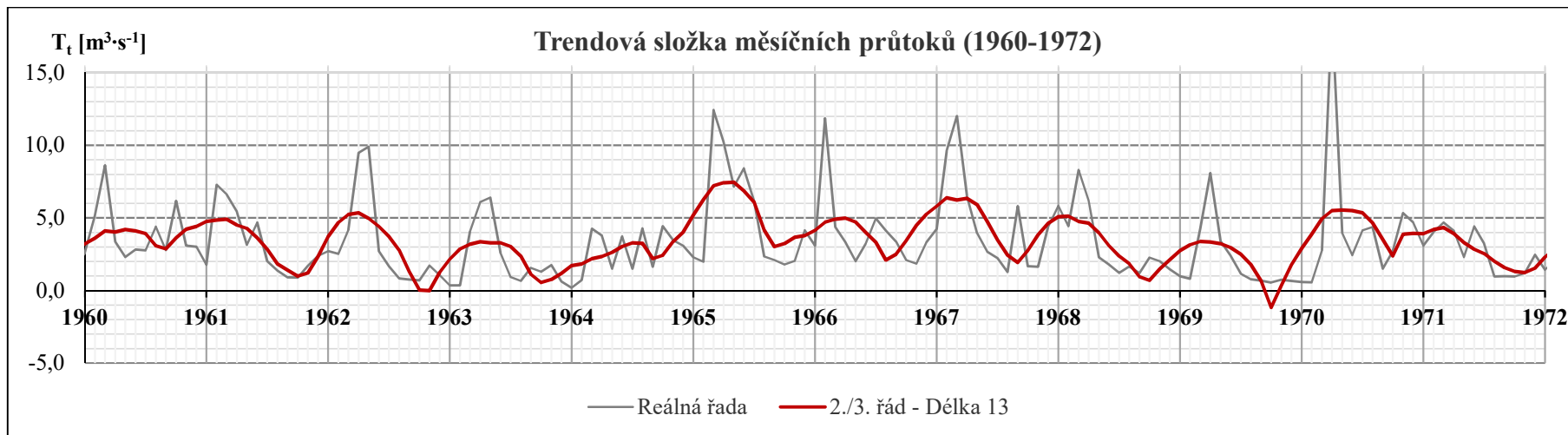
5.4.5 Trendová složka

Trendová složka byla stanovena metodou klouzavých průměrů. Nejsilnější perioda je délky 12, avšak sudé délky způsobují problémy v interpretaci výsledků, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách věnujících se této tematice. Druhé největší hodnoty dosahovala skrytá perioda délky 13, proto byl vybrán klouzavý průměr této délky k výpočtu trendové složky.

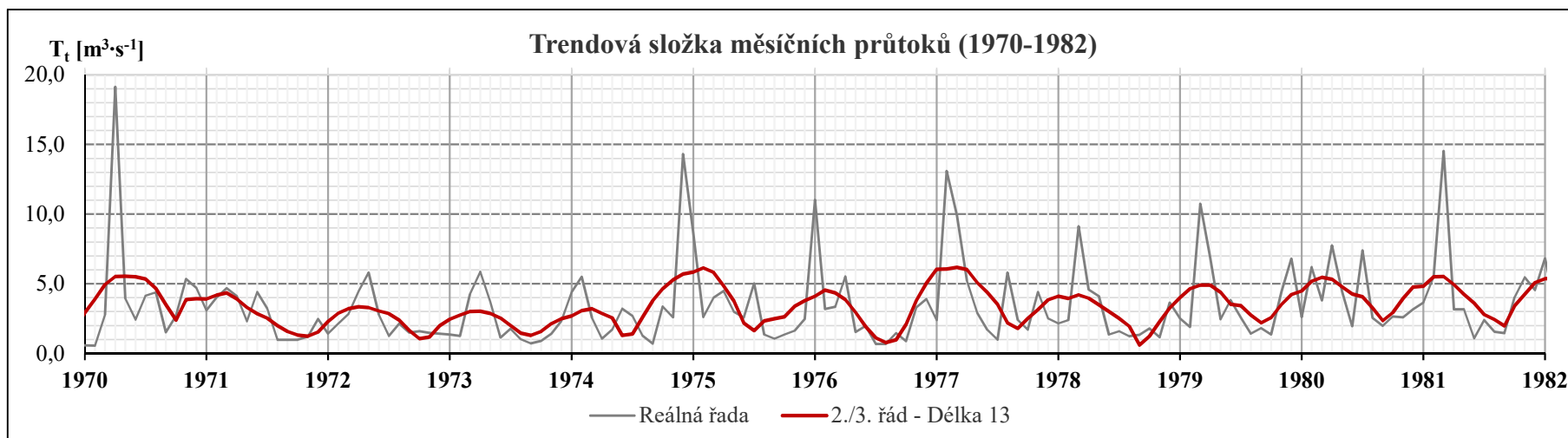
Řád klouzavého průměru byl zvolen 2./3. dle kapitoly 4.7. Výpočetní vztah je uveden v tabulce 4.7-1. Průběh trendové složky byl stanoven pro celé zkoumané období, avšak tento graf je velmi rozměrný, proto je graf rozdělen na sedm dílčích grafů, které jsou uvedeny na následujících stranách, viz obrázky 5.4-15 až 5.4-21.



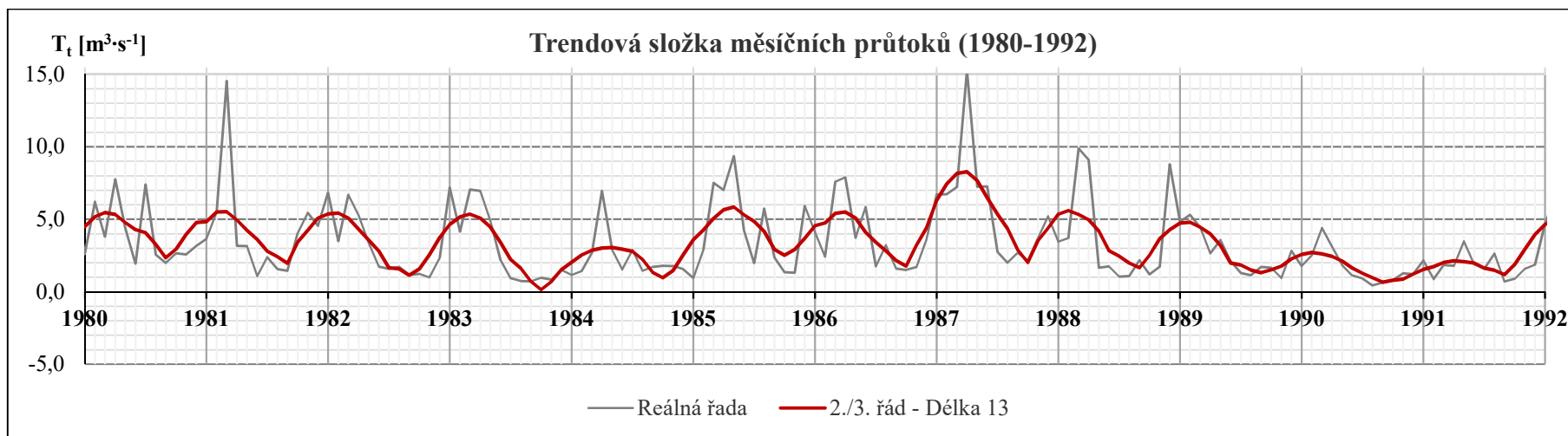
Obr. 5.4-15 Trendová složka měsíčních průtoků (1950-1962)



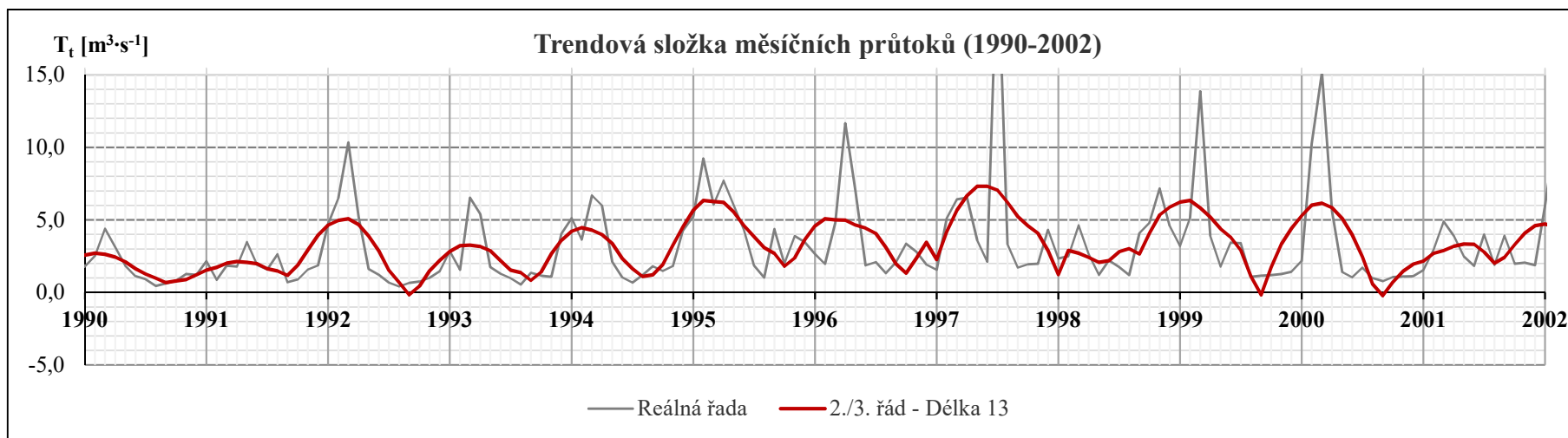
Obr. 5.4-16 Trendová složka měsíčních průtoků (1960-1972)



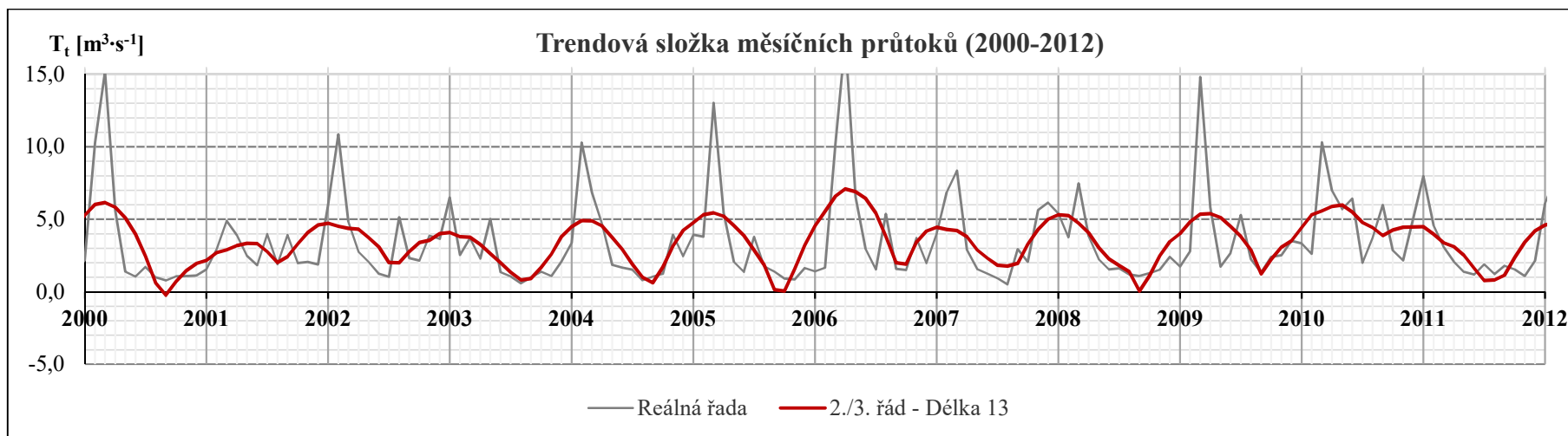
Obr. 5.4-17 Trendová složka měsíčních průtoků (1970-1982)



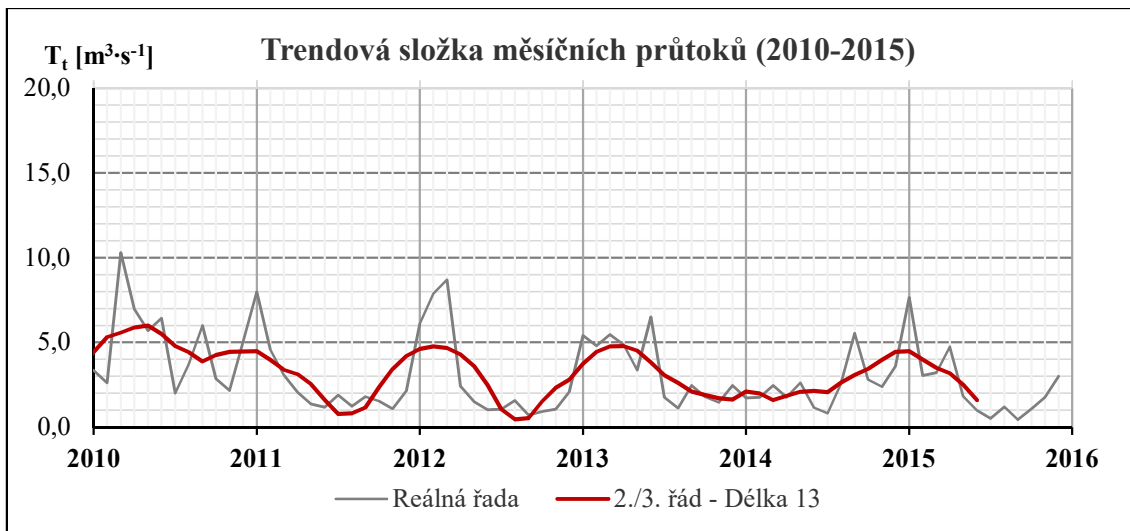
Obr. 5.4-18 Trendová složka měsíčních průtoků (1980-1992)



Obr. 5.4-19 Trendová složka měsíčních průtoků (1990-2002)



Obr. 5.4-20 Trendová složka měsíčních průtoků (2000-2012)



Obr. 5.4-21 Trendová složka měsíčních průtoků (2010-2015)

6 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou shrnuty závěrečné výsledky, které vychází z praktické aplikace. V první kapitole budou shrnuty výsledky na úrovni ročních průtoků, v druhé kapitole výsledky průtoků měsíčních. Třetí kapitola bude vyhodnocovat měsíční průtoky z pohledu nestacionárních procesů.

6.1 Roční průtoky

Řada ročních průtoků prokazatelně podléhá periodicitě o délce 10 let. Tento fakt vyplývá z výpočtu autokorelační funkce, viz kapitola 5.3.1. Desetiletou periodicitu potvrzuje také graf spektrální hustoty, viz obrázek 5.3-2, kde je na první pohled zřejmý lokální extrém odpovídající délce skrytých period 10 roků.



Obr. 6.1-1 Trendová složka ročních průtoků

Již zmíněnou periodicitu potvrzuje také vývoj trendové složky na obrázku 6.1-1. Jak bylo zmíněno v kapitole 5.3.3, v grafu trendové složky se s relativní pravidelností vyskytují lokální minima a lokální maxima. Pro zdůraznění jsou vypsány roky, ve kterých se lokální extrémy nacházejí. Významná lokální maxima trendu se nacházejí v letech 1958, 1967, 1978, 1986, 1996, 1998, 2008. Naopak lokální minima trendu se nacházejí v letech 1960, 1972, 1982, 1992, 2002. Ve vypsané posloupnosti lokálních maxim lze vidět, že se vyskytují přibližně po deseti letech, a to u kalendářních roků končících čísly 6, 7, 8. U lokálních minim je desetiletá perioda výrazně pravidelnější, tato minima se převážně vyskytují u kalendářních roků končících číslem 2. Maxima trendu se v některých případech (například 1996, 1998) pohybují v blízkosti roků, kdy byly zaznamenány nejvyšší vodní stavy, viz tabulka 6.1-1.

Tab. 6.1-1 Nejvyšší zaznamenané vodní stavy (hlásný profil Dalečín) [6]

[cm]	V. - XI.	[cm]	XII. - IV.
263	08.07.1997	194	25.03.1955
232	17.07.1965	235	31.03.2006
163	21.10.1960	190	31.03.1962
156	07.06.1964	180	08.12.1974
		179	28.12.1954

Na obrázku 6.1-1 lze zpozorovat, že lokální maxima jsou jakýmsi vrcholem postupně se vyvíjející zaoblené křivky. Naopak u lokálních minim je patrná ostrá změna prudkého poklesu trendu na prudký nárůst trendu.

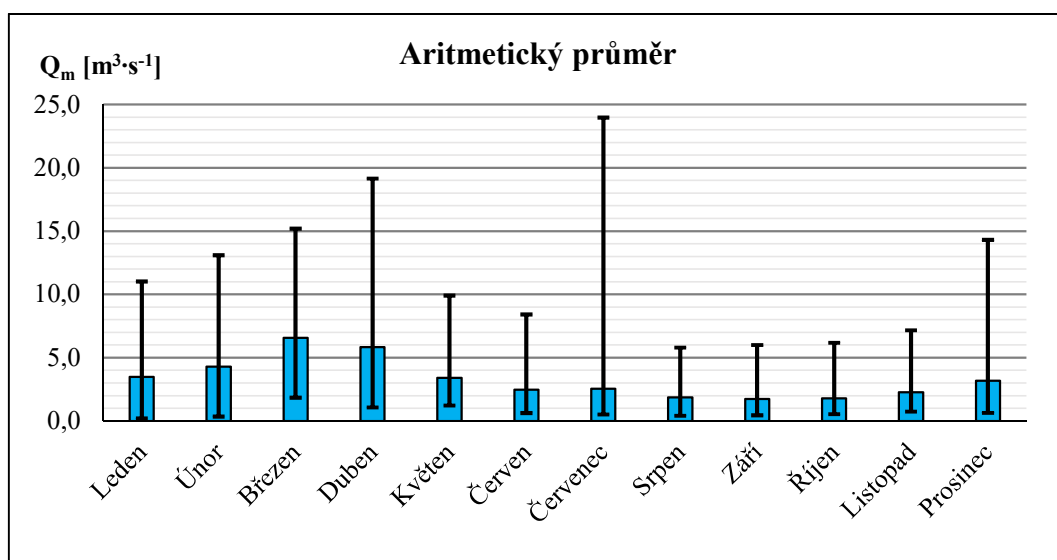
6.2 Měsíční průtoky

6.2.1 Vybrané statistické charakteristiky

V této kapitole budou shrnuty výsledky praktické aplikace některých statistických charakteristik na hydrologickou řadu měsíčních průtoků.

6.2.1.1 *Aritmetický průměr*

Hodnoty aritmetického průměru jsou sepsány v tabulce 5.4-1. Z hodnot aritmetického průměru a grafu na obrázku 6.2-1 lze vyvodit závěr, že v průměru největší průtoky jsou na začátku jarního období, naopak ty nejmenší na konci léta a na začátku podzimu.



Obr. 6.2-1 Aritmetický průměr s vyznačenými chybovými úsečkami (Minimum/Maximum)

Obecně lze o zimních měsících říci, že u nich dochází k postupnému nárůstu průtoků od prosince do února. Mezi únorem a březnem je velký nárůst průtoků, ten může být způsoben zvýšeným táním sněhové pokrývky. Naopak mezi dubnem a květnem je výrazný pokles průtoků, příčiny tohoto poklesu mohou být různé. Mezi možné příčiny by

mohl patřit fakt, že veškerá zbylá sněhová pokrývka roztála v dubnu, tudíž květnové průtoky již nejsou zvyšovány vodou z tání sněhu. Od března až do září je patrný pokles průtoků s mírným zvýšením v červenci. Toto zvýšení mohou vyvolávat již zmíněné přivalové srážky, které se často vyskytují v červenci nebo srpnu. Nižší průtoky v letních měsících nemusí být nutně zapříčiněny menším podílem srážek, možnou příčinou může být větší výpar, který je typický pro letní horké měsíce. Od září dochází k pozvolnému nárůstu až do konce roku.

6.2.1.2 *Disperze*

Průběh disperze je znázorněn v grafické závislosti na obrázku 5.4-3. V kapitole 5.4.1.2 bylo popsáno, že nejvyšší disperzi mají měsíce únor, březen, duben a červenec. Zvýšená disperze měsíců únor, březen, duben může být ovlivněna množstvím spadlého sněhu a jeho následným táním. Podíl vody z roztátého sněhu může výrazně zvyšovat průtoky v daném měsíci. Červencová hodnota disperze je navyšována v důsledku extrémních hodnot průtoků, které jsou pro červenec typické.

Červen, srpen, září, říjen mají nízkou disperzi, znamená to, že v těchto měsících se hodnoty průtoků pohybují relativně blízko průměrné hodnoty. Malá disperze může také znamenat relativně stálé hodnoty průtoků, které se nevyvíjejí v čase. Naopak u měsíců s vysokou disperzí může probíhat určitá změna, která se v čase vyvíjí.

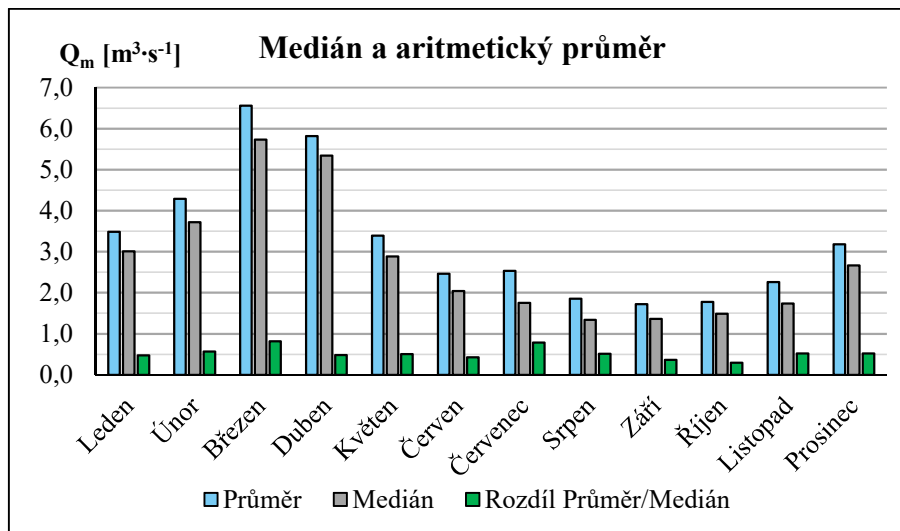
6.2.1.3 *Medián*

Všechny kalendářní měsíce mají kladný koeficient asymetrie, tento fakt znamená naklonění hodnot průtoků na levou stranu od průměru směrem k menším hodnotám. Toto naklonění potvrzují i hodnoty v tabulce 6.2-1. U všech měsíců se podíl průtoků menších, jak průměr pohybuje okolo hodnoty 60 %. Dále je u každého měsíce rozdíl průměru a mediánu kladný tzn. medián má vždy menší hodnotu než aritmetický průměr.

Tab. 6.2-1 Porovnání mediánu a aritmetického průměru

	Průměr [m ³ ·s ⁻¹]	Medián [m ³ ·s ⁻¹]	Rozdíl Průměr/Medián [m ³ ·s ⁻¹]	Průtoky menší jak průměr [%]	Průtoky větší jak průměr [%]
Leden	3,488	3,012	0,477	60,6	39,4
Únor	4,291	3,722	0,570	59,1	40,9
Březen	6,558	5,738	0,820	56,1	43,9
Duben	5,820	5,340	0,480	59,1	40,9
Květen	3,394	2,888	0,506	60,6	39,4
Červen	2,466	2,039	0,428	63,6	36,4
Červenec	2,534	1,751	0,783	69,7	30,3
Srpen	1,855	1,342	0,513	66,7	33,3
Září	1,726	1,362	0,364	68,2	31,8
Říjen	1,780	1,488	0,292	63,6	36,4
Listopad	2,261	1,740	0,521	65,2	34,8
Prosinec	3,182	2,664	0,519	59,1	40,9

Průběh mediánu a aritmetického průměru v rámci roku je znázorněn na obrázku 6.2-2. Ve vývoji mediánu v průběhu kalendářního roku se objevují výrazné extrémny v březnu a dubnu. Od ledna medián průtoků narůstá až do března, od března medián klesá, a to až do srpna. Od srpna začíná opětovný nárůst hodnoty mediánu až do konce roku.



Obr. 6.2-2 Porovnání mediánu a aritmetického průměru měsíčních průtoků

V kapitole 5.4.1.1, která se věnovala aritmetickému průměru, byl popsán fakt, že červencová hodnota aritmetického průměru narušuje klesání aritmetického průměru od března do září. Tato červencová hodnota byla ovlivněna několikrát zmiňovaným průtokem v roce 1997. Výhodou mediánu je lepší zpracování těchto abnormálních hodnot, tato výhoda pramení ze samotného principu stanovení mediánu. Medián tedy v některých případech může oproti aritmetickému průměru lépe popsat hydrologickou řadu. V případě zkoumané řady se medián a aritmetický průměr mírně liší hodnotou, avšak roční průběh je velmi podobný.

6.2.1.4 *Minimum, maximum*

Minimální a maximální hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.4-2, grafické znázornění je na obrázku 5.4-8. Průběh minimálních a maximálních hodnot je podobný průběhu aritmetického průměru pomineme-li anomálie červencové hodnoty způsobené častým výskytem přívalových srážek v červenci. Výrazné maximální hodnoty v březnu a dubnu jsou nejspíše ovlivněné táním sněhové pokrývky. Maximální hodnota v červenci je ovlivněna povodňovým průtokem v roce 1997.

V tabulce 6.2-2 jsou znázorněny kalendářní roky, ve kterých se v každém měsíci vyskytly minimální a maximální hodnoty. Minimální měsíční hodnoty se vyskytly v některých rocích dokonce dvakrát, a to v roce 1963, 1969, 2015. Například výskyt minimálních hodnot v červenci a září v roce 2015 potvrzuje aktuální problematiku sucha v České republice. U maximálních hodnot se vyskytuje opět červenec 1997. Maxima se dvakrát vyskytla pouze v roce 1977, v tomto roce dosahovaly průtoky vyšších hodnot,

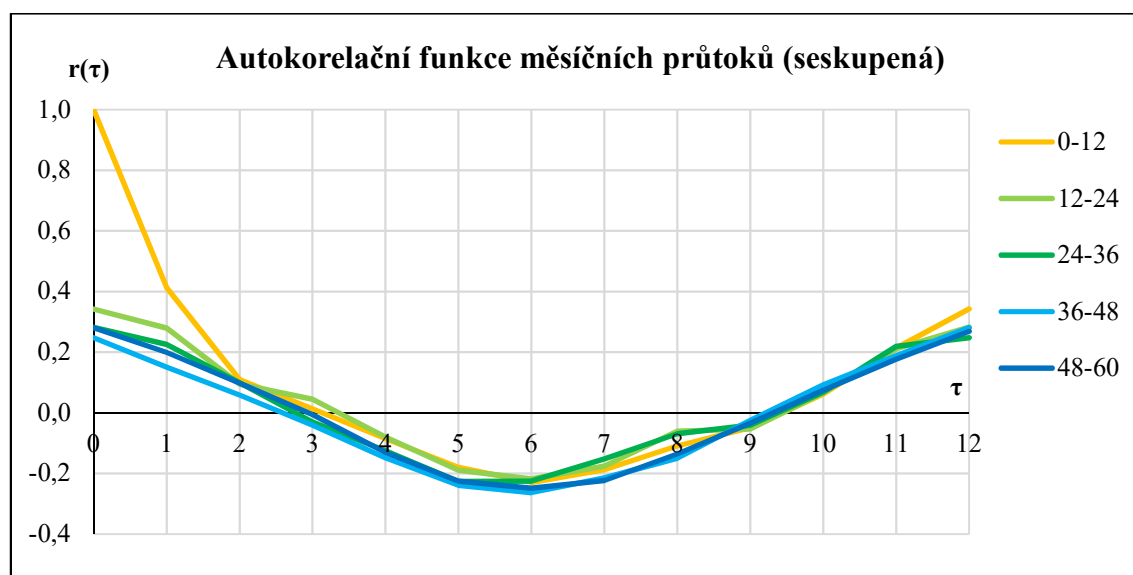
což potvrzuje fakt, že se na území České republiky vyskytovaly povodně, například na řece Berounce [18].

Tab. 6.2-2 Přehled roků, ve kterých se vyskytly minimální a maximální hodnoty

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Maximum	1976	1977	2000	1970	1962	1965	1997	1977	2010	1960	1998	1974
Minimum	1964	1963	1991	1974	1998	1950	2015	1992	2015	1969	1969	1963

6.2.2 Autokorelační funkce a spektrální hustota

Nejen že řada ročních průtoků podléhá desetileté periodě, ale také řada měsíčních průtoků podléhá určité periodicitě. Již v grafu na obrázku 5.4-13 byla zřejmá výrazná dvanáctiměsíční periodicitu autokorelační funkce. Na obrázku 6.2-3 byly jednotlivé úseky s délkou dvanácti posunů seskupeny v jeden graf. Tento graf zdůrazňuje periodické chování autokorelační funkce, protože jednotlivé úseky splývají téměř v jednu křivku. Periodicitu potvrzuje také kapitola 5.4.4 věnující se spektrální hustotě, v které byla nalezena dvanáctiměsíční délka skrytých period.

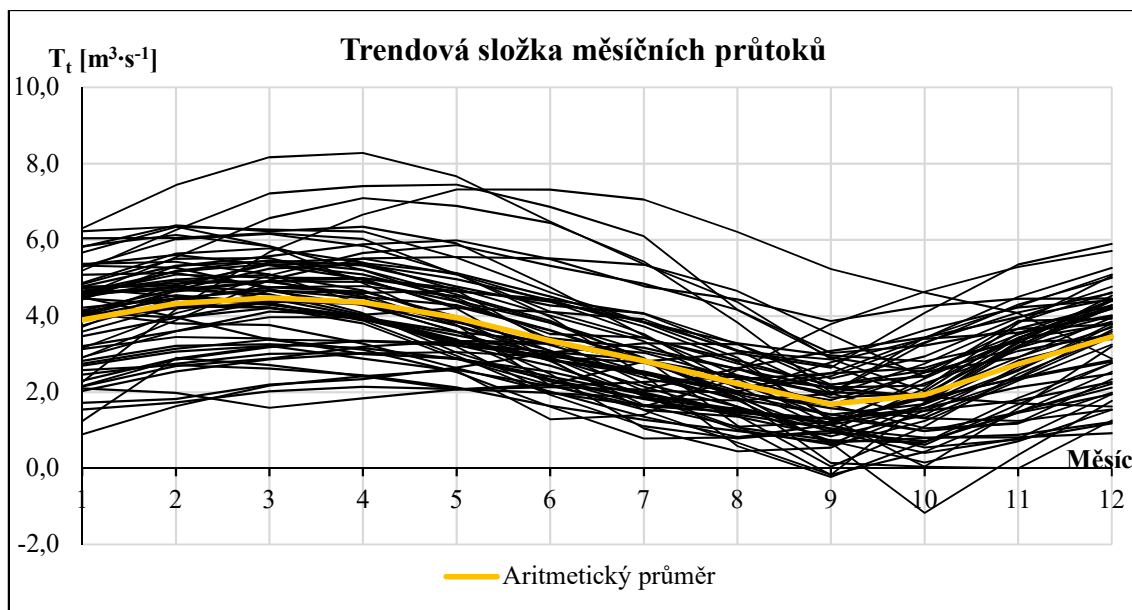


Obr. 6.2-3 Autokorelační funkce měsíčních průtoků (seskupená)

6.2.3 Trendová složka

Dvanáctiměsíční periodicitu popsanou v předchozí kapitole potvrzuje také graf na obrázku 6.2-4, jedná se o graf trendové složky seskupený po jednotlivých letech s vyznačeným aritmetickým průměrem. Jednotlivé křivky trendové složky svým tvarem připomínají sinusoidu s již zmíněnou dvanáctiměsíční periodou.

Průběh trendové složky také potvrzuje závěr, že největší hodnoty průtoků jsou na začátku jarního období, konkrétně v březnu a dubnu. Od května průměrná trendová složka klesá až do září, kdy dosahuje nejmenší hodnoty. V podzimním období lze sledovat nárůst, který pokračuje až do konce kalendářního roku.



Obr. 6.2-4 Trendová složka měsíčních průtoků

6.3 Nestacionární procesy měsíčních průtoků

Doposud bylo analyzováno chování řady průtoků ročních a měsíčních (statistické charakteristiky, autokorelační funkce...). V této kapitole 6.3 bude řada měsíčních průtoků pozorována z hlediska nestacionárních procesů.

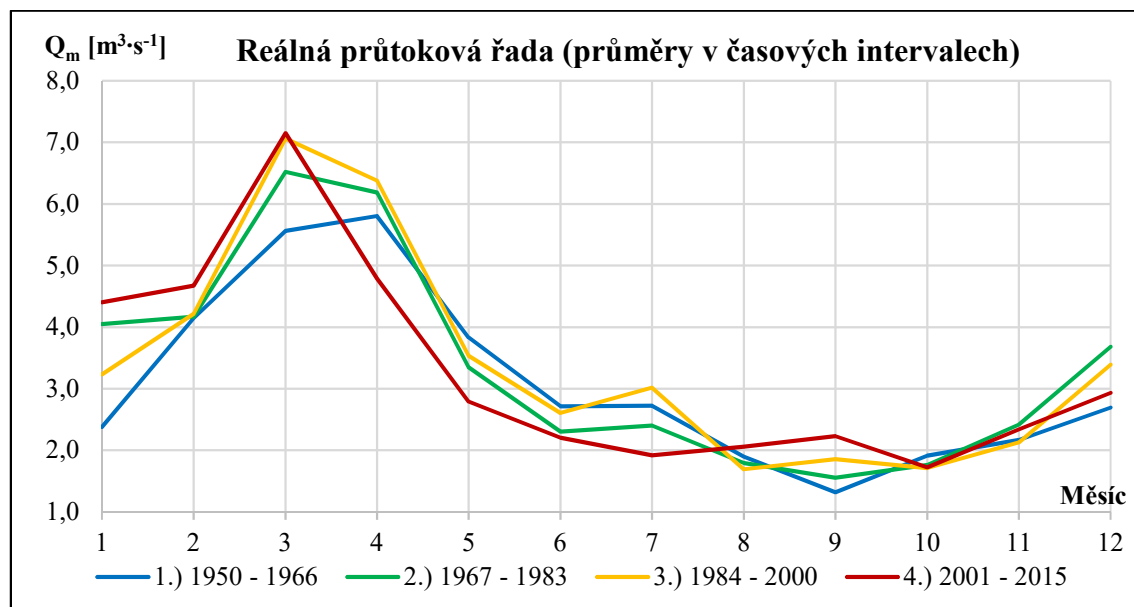
6.3.1 Aritmetický průměr

Zkoumané období od roku 1950 do roku 2015 bylo rozděleno na čtyři dílčí období. První období (1950–1966), druhé (1967–1983), třetí (1984–2000) a čtvrté období (2001–2015). Pro zmíněná období byl stanoven průměr pro každý kalendářní měsíc samostatně a sestaven graf, viz obrátek 6.3-1.

V grafu je vidět, že průměrná lednová hodnota čtvrtého období je téměř dvojnásobná oproti lednové hodnotě v prvním období. U ledna však nedochází k postupnému nárůstu průměrných hodnot. Únorové průměry vykazují nepatrný postupný nárůst od prvního období až do čtvrtého období.

Hodnoty průměrů v březnu postupně narůstají od prvního období stejně jako únorové. U dubna je též znatelný nárůst, který probíhá až do třetího období, ve čtvrtém období dubnové průměry výrazně poklesly. Maximální hodnota průtoků v rámci roku se v prvním období vyskytovala v měsíci dubnu, v druhém období se přesunula do března, kde pozvolně rostla. Průměry v květnu a červnu se chovají velmi podobně, ve čtvrtém období nižší hodnoty než v prvním období. Červenec nevykazuje postupný nárůst ani postupný pokles. U července je znatelné nepravidelné chování způsobené vysokou disperzí hodnot, která má původ v častém výskytu přívalových srážek v tomto měsíci. Srpnové průměry nejsou výrazněji vychýleny, to může být způsobené nízkou disperzí viz, kapitola 5.4.1.2. V září průměry opět pozvolně narůstají jako například v únoru, březnu. V prvních dvou obdobích se minimální hodnota grafu nachází v září, ve třetím období se

minimální hodnota přesouvá do srpna a ve čtvrtém do října. Říjen je měsíc s nejnižší disperzí, tento poznatek potvrzují data vyobrazená v grafu. Říjnové hodnoty průměrů jsou si velmi podobné. Listopad má také nízkou disperzi, hodnoty průměrů jsou si proto také velmi blízké. V prosinci se od sebe hodnoty více odchyľují zřejmě proto, že prosinec má přibližně dvakrát větší disperzi než listopad.



Obr. 6.3-1 Průměrné hodnoty jednotlivých časových intervalů

6.3.2 Maximální hodnoty

Pozorované období od roku 1950 do roku 2015 bylo rozříděno podle toho, v jakém měsíci byl měsíční průtok tím maximálním v daném roce. Výsledkem je počet výskytů pro každý kalendářní měsíc, viz poslední sloupec tabulky 6.3-1. Počty výskytů z posledního sloupce tabulky byly rozříděny do tří časových období podle roků, v jakých se maxima vyskytovala.

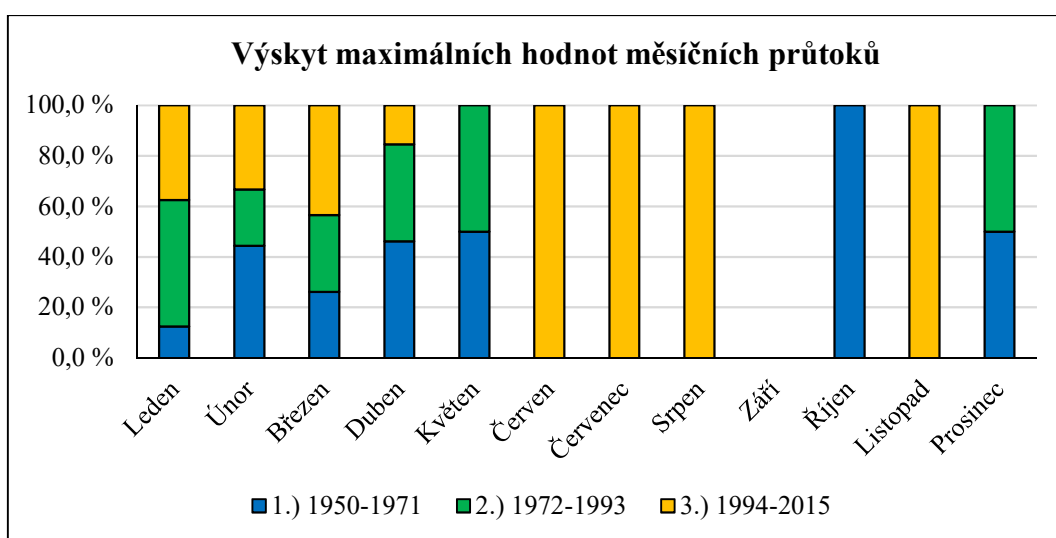
Tab. 6.3-1 Výskyt maximálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech

	1950-1971	1972-1993	1994-2015	Celkový počet výskytů
Leden	12,5 %	50,0 %	37,5 %	8
Únor	44,4 %	22,2 %	33,3 %	9
Březen	26,1 %	30,4 %	43,5 %	23
Duben	46,2 %	38,5 %	15,4 %	13
Květen	50,0 %	50,0 %	0,0 %	6
Červen	0,0 %	0,0 %	100,0 %	1
Červenec	0,0 %	0,0 %	100,0 %	1
Srpen	0,0 %	0,0 %	100,0 %	1
Září	-	-	-	0
Říjen	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
Listopad	0,0 %	0,0 %	100,0 %	1
Prosinec	50,0 %	50,0 %	0,0 %	2

Z tabulky 6.3-1 a z obrázku 6.3-2 je patrné, že výskyt maximálních hodnot v březnu s postupem času roste, naopak tomu je u dubna, u kterého výskyt maximálních hodnot klesá s časem. V průběhu roků pozorování dochází k prokazatelné změně výskytu maximální hodnoty z dubna do března.

U měsíců leden, únor, květen nedochází k prokazatelnému poklesu nebo nárůstu výskytu maximálních hodnot v těchto měsících. Chování těchto měsíců je z hlediska zkoumaného kritéria této kapitoly nahodilé.

V měsících červen až prosinec se maximální hodnota buď nevyskytla, nebo se vyskytla jednou či dvakrát. U těchto měsíců tudíž nemůžeme komentovat možné změny, výskyt maximálních hodnot v těchto měsících je způsobený u převážné většiny nějakými abnormálními hodnotami jako například již zmiňované povodně v roce 1997.



Obr. 6.3-2 Výskyt maximálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech

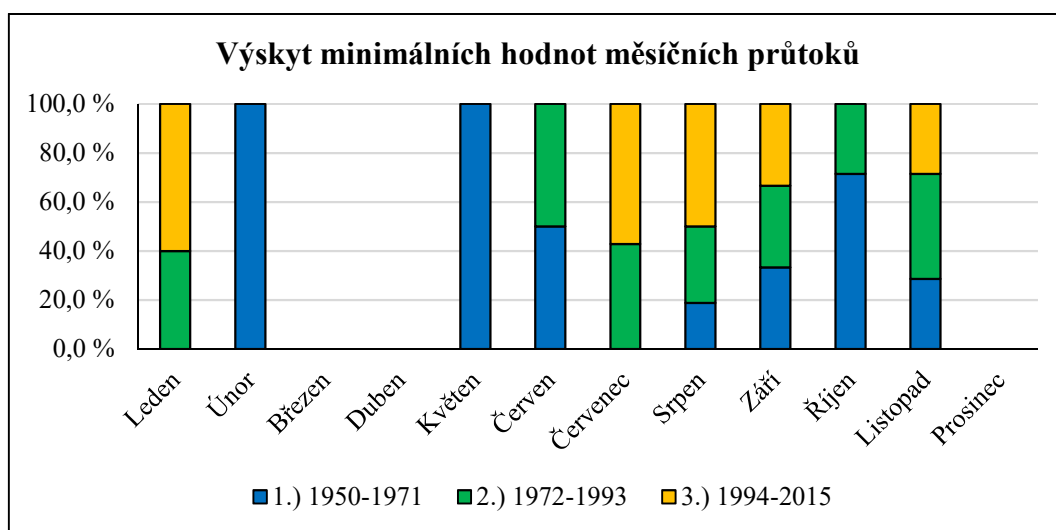
6.3.3 Minimální hodnoty

V předchozí kapitole byly analyzovány maximální hodnoty, v této kapitole jsou analyzovány hodnoty minimální. Pozorované období bylo opět roztříděno s mírným rozdílem oproti předchozí kapitole. V této kapitole byla data roztříděna podle toho, v jakém měsíci byl měsíční průtok tím minimálním v daném roce. Výsledkem je opět tabulka s počtem výskytů pro každý kalendářní měsíc, viz tabulka 6.3-2. Počty výskytů z posledního sloupce tabulky byly také roztříděny do tří časových období, byl sestaven graf, viz obrázek 6.3-3.

Tab. 6.3-2 Výskyt minimálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech

	1950-1971	1972-1993	1994-2015	Celkový počet výskytů
Leden	0,0 %	40,0 %	60,0 %	5
Únor	100,0 %	0,0 %	0,0 %	3
Březen	-	-	-	0
Duben	-	-	-	0
Květen	100,0 %	0,0 %	0,0 %	2
Červen	50,0 %	50,0 %	0,0 %	4
Červenec	0,0 %	42,9 %	57,1 %	7
Srpen	18,8 %	31,3 %	50,0 %	16
Září	33,3 %	33,3 %	33,3 %	15
Říjen	71,4 %	28,6 %	0,0 %	7
Listopad	28,6 %	42,9 %	28,6 %	7
Prosinec	-	-	-	0

V měsíci září je výskyt minimálních hodnot stejný ve všech třech časových intervalech. Září se tedy chová relativně konstantně, co se týká tématu této kapitoly. U srpna dochází k postupnému navyšování výskytu minimálních hodnot. U převážné většiny měsíců je výskyt minimální hodnoty nulový nebo v řádech několika jednotek. Například v červenci dle výpočtů stoupá výskyt minimálních hodnot, naopak v říjnu výskyt klesá. Problémem u měsíců červenec a říjen je ten, že celkový výskyt minimálních hodnot je pouhých sedm. Je tedy otázkou, zdali je tento výsledek ještě reprezentativní.



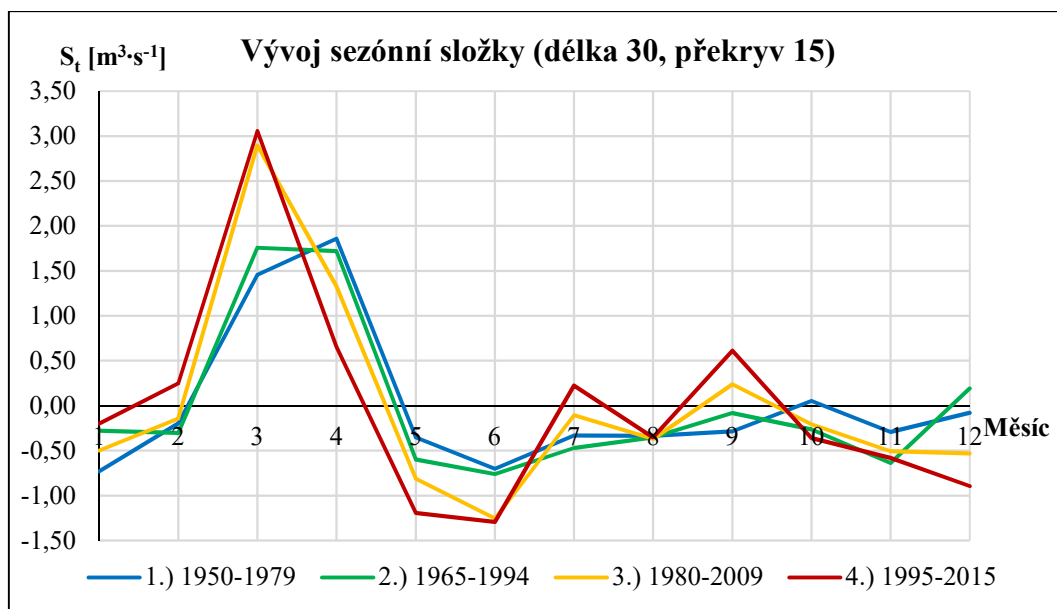
Obr. 6.3-3 Výskyt minimálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech

6.3.4 Sezónní složka

Sezónní složka byla zpracována podle kapitoly 4.8 a byla stanovena vždy pro dílčí časové úseky. Změny v sezónní složce byly analyzovány na dvou případech. V prvním případě se časová řada rozdělila na období délky 30 let, která se překrývají o 15 let. V druhém případě na období délky 40 let s překryvem 20 let.

6.3.4.1 Délka období 30 let, překryv průtoků 15 let

Výsledky analýzy změn v sezónní složce jsou graficky znázorněny na obrázku 6.3-4. První tři období dosahují délky 30 let, poslední období délky 26 let. Poslední období sice není stejně reprezentativní jako první tři, z grafu je však patrné, že poslední období zapadá do vývoje sezónní složky.



Obr. 6.3-4 Vývoj sezónní složky (délka 30, překryv 15)

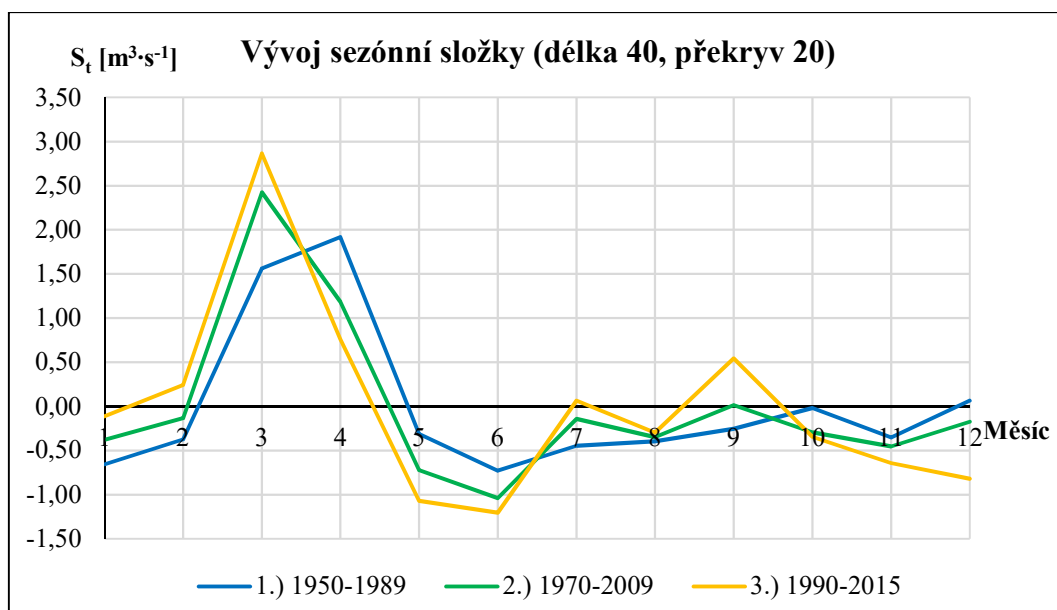
V předešlé kapitole 6.3.2 byl vyvozen fakt, že maximální hodnota se přesouvá z dubna do března, tento poznatek je patrný i v grafické závislosti na obrázku 6.3-4.

Rozdíl hodnoty sezónní složky mezi dubnem a květnem se příliš nemění, spojnice již zmíněných měsíců se posouvá směrem dolů k nižším hodnotám. Sezónní složka dubna a května se tedy postupně snižuje relativně stejným tempem. V červnu dochází k postupnému zvyšování extrémů sezónní složky, červen je zároveň měsíc s nejnižší sezónní složkou. V průběhu pozorovaného období se zvyšuje rozdíl hodnot sezónních složek měsíců červen a červenec, protože hodnoty sezónní složky června klesají a naopak červencové rostou. Srpen je nejstálejším měsícem, co se týká sezónní složky, hodnoty se v tomto měsíci výrazně nemění. Sezónní složka září také postupně narůstá, jako červencová.

U měsíců leden, únor, říjen, listopad, prosinec nedochází k čistě pravidelnému nárůstu nebo poklesu. V lednu můžeme pozorovat téměř pravidelný nárůst, avšak narušený anomálií 2. období. V prosinci dochází naopak k téměř pravidelnému poklesu, který je opět narušen 2. období.

6.3.4.2 Délka období 40 let, překryv průtoků 20 let

V této kapitole bude znovu popsána analýza sezónní složky, ale za jiných parametrů. Výsledky analýzy jsou graficky znázorněny na obrázku 6.3-5. První dvě období dosahují délky 40 let, poslední období délky 26 let. Poslední období je opět méně reprezentativní, ale může dokreslit chování sezónní složky. Mohlo by se zdát, že tato kapitola je téměř kopií předchozí, větší délka sledovaného období však může odhalit změny, které mají dlouhodobější charakter.



Obr. 6.3-5 Vývoj sezónní složky (délka 40, překryv 20)

Grafické znázornění na obrázku 6.3-5. potvrzuje výsledky z předchozí kapitoly a zobrazuje ještě něco navíc.

Lednová hodnota sezónní složky již postupně roste bez anomálií, prosincová bez anomálií klesá. Rozdíl lednové a únorové hodnoty je v čase téměř neměnný. Rozdíl hodnot mezi červnem a květnem se postupem času zmenšuje, mohl by to být postupný přesun minimální hodnoty z června na květen, pro potvrzení tohoto faktu jsou zapotřebí další roky zkoumání. V grafu je patrné, že lokální maximum se přesunulo z října (1. období) do září (2. a 3. období). Dále dochází k pozvolnému snižování sezónní složky v listopadu.

7 ZÁVĚR

Jedním z cílů bakalářské práce bylo provést základní analýzu časové průtokové řady. Analýza byla provedena na úrovni ročních a měsíčních průtoků. Hlavním poznatkem na úrovni ročních průtoků je, že průtoková řada podléhá desetileté periodicitě. Důkazem této periodicity je také relativně pravidelný výskyt lokálních extrémů trendové složky ročních průtoků. Dále byla analyzována řada měsíčních průtoků, která podléhá periodicitě délky 12 měsíců. Tato periodicitu byla potvrzena několika dílčími výsledky, které jsou podrobněji shrnuty v kapitole 6.2. V rámci analýzy měsíčních průtoků byly zpracovány také vybrané statistické charakteristiky. Z hodnot a z grafů již zmíněných statistických charakteristik vyplývá, že největší průtoky lze očekávat na začátku jarního období naopak nejmenší na konci léta a začátku podzimu. Mezi nejstálejší měsíce, co se týká měsíčních průtoků lze zařadit srpen, září a říjen, z nichž říjen dosahuje nejmenší disperze. Stanovená trendová složka měsíčních průtoků tvarem připomíná sinusoidu s dvanáctiměsíční periodou.

Dalším cílem bakalářské práce bylo odhadnout možné změny v chování řady měsíčních průtoků. Tuto problematiku řeší kapitola 6.3. V průběhu zkoumaného období dochází k prokazatelnému přesunu maxima průtoků z dubna na březen. V rámci analýzy změn byl také zkoumán vývoj sezónní složky. U několika měsíců dochází k pozvolnému nárůstu sezónní složky, konkrétně u ledna, února, března, července, srpna a září. Naopak u dubna, května, června, listopadu, října a prosince dochází k poklesu sezónní složky. O výsledcích, které plynou z praktické aplikace, lze souhrnně říci, že dochází k přerozdělování průtoků, k nárůstu průtoků v jednom měsíci, k poklesu v jiném a ke zvyšování extrémů průtoků.

Zvolené metody (autokorelační funkce, spektrální hustota, statistické charakteristiky, metoda klouzavých průměrů...) se projevily jako vhodné pro analýzu průtokové řady. Tyto metody jsou také běžně využívány v praxi, jak potvrzuje například kapitola 2. Věrohodnost výsledků potvrzuje fakt, že výsledky aplikace jedné metody potvrzují výsledky z aplikace metody druhé a naopak.

V této práci byly metody aplikovány na jedno zájmové povodí s měsíční průtokovou řadou o délce 66 let. V budoucnu by mohlo být téma této bakalářské práce rozšířeno o výzkum na dalších průtokových řadách z jiných povodí. Další možnou nadstavbou by mohlo být rozšíření práce o komplexnější metody analýzy časových průtokových řad. Jako například využití Mann–Kendallového testu trendu, Pettittova testu pro určení zlomového bodu, testu Random Walk (Náhodné procházky) a v neposlední řadě i Wavelet analýzy.

Jak již bylo zmíněno, v průtokové řadě dochází k určitým změnám, avšak v rozsahu této bakalářské práce nelze prokazatelně říci, zdali mají tyto popisované změny původ v klimatické změně, která je v současnosti často diskutována. Ať už jsou změny v průtocích důsledkem klimatické změny nebo ne, je třeba se analýzám časových průtokových řad stále věnovat. Každý nový poznatek o chování časové průtokové řady umožní přesnější předpovídání průtoků, které napomůže k lepšímu využití akumulované vody, protože rozumné a šetrné hospodaření s povrchovou vodou bude mít vliv téměř na všechny sféry lidské činnosti.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] STARÝ, Miloš. *Hydrologie (Modul 01)*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [2] CIPRA, Tomáš. *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [3] WU, J.; WANG, Z.; DONG, Z.; TANG, Q.; LV, X.; DONG, G. *Analysis of Natural Streamflow Variation and Its Influential Factors on the Yellow River from 1957 to 2010*. *Water* 2018, 10, 1155.
- [4] WANG, X.; ENGEL, B.; YUAN, X.; YUAN, P. *Variation Analysis of Streamflows from 1956 to 2016 Along the Yellow River, China*. *Water* 2018, 10, 1231.
- [5] STARÝ, Miloš. *Hydrologie (Modul 03)*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [6] *Evidenční list hlásného profilu č.371* [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2019-01-30].
Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=2505253
- [7] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2019-01-30].
Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=16.1015000&y=49.8284000&z=11>
- [8] *Hydrologické údaje ve vybraných profilech vodních útvarů v oblasti povodí Dyje* [online]. Povodí Moravy [cit. 2019-01-30].
Dostupné z: http://www.pmo.cz/pop/2009/Dyje/end/a-popis/tabulky/ta_2_1b.pdf
- [9] *Povodně 1997: nejtragičtější v Česku ve 20. století, zahynulo 50 lidí* [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://www.lidovky.cz/domov/cervencove-zaplavy-v-roce-1997-byly-nejtragictejsi-ve-20-stoleti.A170704_141508_ln_domov_ele
- [10] HRKAL, Zbyněk. *Voda: včera, dnes a zítra*. Praha: Mladá fronta, 2018. ISBN 9788020449894.
- [11] *Sucho nás trápilo i v historii. Jeho dopady na společnost byly dřív drtivější, hodnotí odborník* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/priroda/sucho-vysoke-teploty-dusledky_1808131815_jak
- [12] *Hydrologická ročenka České republiky 2017* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2018 [cit. 2019-03-26]. ISSN 2533-6312. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/hr17/obsah.html>
- [13] *Hydrologická ročenka České republiky 2016* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2017 [cit. 2019-03-26]. ISSN 2533-6312. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/hr16/obsah.html>
- [14] *Hydrologická ročenka České republiky 2015* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2016 [cit. 2019-03-26]. ISSN 2533-6312. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/hr15/obsah.html>

- [15] NOVICKÝ, Oldřich. *Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2008. ISBN 978-80-85900-79-8.
- [16] *Ministerstvo životního prostředí: Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC)* [online]. [cit. 2019-03-23].
Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/mezivladni_panel_pro_zmenu_klimatu
- [17] NACHÁZEL, Karel. *Stochastické metody ve vodním hospodářství*. Praha: České vysoké učení technické, 1993.
- [18] *Povodně v Berouně: Historické povodně* [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: https://www.gymberoun.cz/uploads/web_files/dud/dud2015/KrizovaRoztocilovaASokolovaPovodne/historicke%20povodne.html
- [19] *How do human activities contribute to climate change and how do they compare with natural influences?* [online]. European Environment Agency [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/faq/how-do-human-activities-contribute-to-climate-change-and-how-do-they-compare-with-natural-influences>
- [20] COOK, J.; NUCCITELLI, D.; GREEN, S. A.; RICHARDSON, M.; WINKLER, B.; PAINTING, R.; WAY, R.; JACOBS, P.; SKUCE, A. *Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/024024#references>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$C_s(Q_m)$	koeficient asymetrie průtoků daného měsíce
C_t	cyklická složka
$C_v(Q_m)$	koeficient variace průtoků daného měsíce
$D(Q_m)$	rozptyl průtoků daného měsíce
E_t	reziduální složka
i	pořadí hodnoty v seřazené řadě
n	počet roků sledování, celkový počet hodnot v souboru
m	celkový počet kroků autokorelační funkce
\bar{Q}_m	aritmetický průměr průtoků daného měsíce
$Q_{m,i}$	průměrný průtok v daném měsíci v roce i
$r(\tau)$	koeficient korelace
$s(Q_m)$	směrodatná odchylka průtoků daného měsíce
S_t	sezónní složka
$S(T)$	spektrální hustota
T	délka periody
T_t	trendová složka
X_i, Y_i	prvky souboru X, Y
y_t	sledovaná hydrologická veličina (např. průtok)
τ	počet posunů, řád autokorelační funkce

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.2-1 Závislost naklonění grafu hustoty pravděpodobnosti na hodnotě koeficientu asymetrie [1]	8
Obr. 4.4-1 Schéma vytvoření vstupů z průtokové řady pro výpočet autokorelační funkce prvního řádu (posun průtoků o jeden řádek).....	9
Obr. 5.2-1 Lokalizace hlásného profilu Dalečín na řece Svratce [7].....	14
Obr. 5.3-1 Autokorelační funkce ročních průtoků.....	15
Obr. 5.3-2 Spektrální hustota ročních průtoků	15
Obr. 5.3-3 Trendové složky ročních průtoků.....	16
Obr. 5.4-1 Reálná průtoková řada seskládaná po jednotlivých rocích	17
Obr. 5.4-2 Aritmetické průměry měsíčních průtoků.....	18
Obr. 5.4-3 Disperze (rozptyly) měsíčních průtoků	18
Obr. 5.4-4 Směrodatné odchylky měsíčních průtoků	19
Obr. 5.4-5 Koeficienty variace měsíčních průtoků.....	19
Obr. 5.4-6 Koeficienty asymetrie (šikmosti) měsíčních průtoků.....	20
Obr. 5.4-7 Mediány měsíčních průtoků	20
Obr. 5.4-8 Minimální a maximální hodnoty měsíčních průtoků, jejich rozdíly	21
Obr. 5.4-9 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (březen)	22
Obr. 5.4-10 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (duben)	22
Obr. 5.4-11 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (červenec).....	22
Obr. 5.4-12 Empirická čára pravděpodobnosti překročení (říjen).....	23
Obr. 5.4-13 Autokorelační funkce měsíčních průtoků	23
Obr. 5.4-14 Spektrální hustota měsíčních průtoků	24
Obr. 5.4-15 Trendová složka měsíčních průtoků (1950-1962).....	25
Obr. 5.4-16 Trendová složka měsíčních průtoků (1960-1972).....	25
Obr. 5.4-17 Trendová složka měsíčních průtoků (1970-1982).....	26
Obr. 5.4-18 Trendová složka měsíčních průtoků (1980-1992).....	26
Obr. 5.4-19 Trendová složka měsíčních průtoků (1990-2002).....	27
Obr. 5.4-20 Trendová složka měsíčních průtoků (2000-2012).....	27
Obr. 5.4-21 Trendová složka měsíčních průtoků (2010-2015).....	28
Obr. 6.1-1 Trendová složka ročních průtoků	29
Obr. 6.2-1 Aritmetický průměr s vyznačenými chybovými úsečkami (Minimum/Maximum).....	30
Obr. 6.2-2 Porovnání mediánu a aritmetického průměru měsíčních průtoků.....	32
Obr. 6.2-3 Autokorelační funkce měsíčních průtoků (seskupená)	33
Obr. 6.2-4 Trendová složka měsíčních průtoků.....	34

Obr. 6.3-1 Průměrné hodnoty jednotlivých časových intervalů	35
Obr. 6.3-2 Výskyt maximálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech	36
Obr. 6.3-3 Výskyt minimálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech.....	37
Obr. 6.3-4 Vývoj sezónní složky (délka 30, překryv 15)	38
Obr. 6.3-5 Vývoj sezónní složky (délka 40, překryv 20)	39

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.7-1 Váhy klouzavých průměrů [2].....	11
Tab. 5.2-1 Hodnoty N-letých průtoků (hlásný profil Dalečín) [6]	14
Tab. 5.2-2 Hodnoty m-denních průtoků (hlásný profil Dalečín) [8]	14
Tab. 5.4-1 Statistické charakteristiky (Metoda momentů)	17
Tab. 5.4-2 Hodnoty minima a maxima	21
Tab. 6.1-1 Nejvyšší zaznamenané vodní stavy (hlásný profil Dalečín) [6].....	30
Tab. 6.2-1 Porovnání mediánu a aritmetického průměru	31
Tab. 6.2-2 Přehled roků, ve kterých se vyskytly minimální a maximální hodnoty	33
Tab. 6.3-1 Výskyt maximálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech.....	35
Tab. 6.3-2 Výskyt minimálních hodnot měsíčních průtoků v časových intervalech.....	37