



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍHO OBJEMU NÁDRŽE VRANOV

WATER MANAGEMENT ANALYSIS OF STORAGE CAPACITY OF THE VRANOV
RESERVOIR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lucie Vítková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lucie Vítková
Název	Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže Vranov
Vedoucí práce	doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

1. CIPRA T., Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
2. MARTON D., STARÝ M., SYNTHE; SYNTHE - Generátory umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků. <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software)
3. MARTON D., STARÝ M., LRMsoft; LRMsoft - generátor umělých měsíčních průtoků. <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software)
4. MARTON D., STARÝ M., MENŠÍK P., UNCERESERVOIR; UNCERESERVOIR - Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže. <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software)
5. STARÝ M., Hydrologie (Modul 01). Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
6. STARÝ M., Hydrologie (Modul 03). Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
7. VÍTKOVÁ L., Vodohospodářské řešení vybrané vodní nádrže. Brno, 2018. 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Suchá epizoda z let 2015 až 2018 vedla k výrazným poklesům nalepšeného odtoku a zásobního objemu nádrže Vranov. Správce a provozovatel nádrže státní podnik Povodí Moravy, s.p. přinutila dlouhodobě nedostatečná kapacita zásobního objemu zavedení speciálních manipulací na vodním díle. Z uvedených důvodů je podrobná analýza časové průtokové řady a zásobního objemu nádrže Vranov velice aktuální téma. Cílem práce je provést detailní analýzu časové řady přítoků vody do nádrže, vytvořit rozšířené hydrologické podklady (umělé průtokové řady) a provést komplexní analýzu zásobního objemu nádrže Vranov s ohledem na možné změny hydrologického cyklu v povodí. Pro splnění vytyčených cílů je nutné použít vhodné nástroje analýzy časové řady, resp. dekompozice hydrologické řady, generátory umělých průtokových řad a simulačního modelu zásobního objemu nádrže. Praktická aplikace bude provedena na zmíněné nádrži Vranov v povodí řeky Dyje a výsledky práce budou částečně sloužit pro potřeby přeshraničního projektu INTERREG AT-CZ "ATCZ28 SEDECO - Sediments, ecosystem services and interrelation with floods and droughts in the AT-CZ border region".

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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 diplomové práce

ABSTRAKT

Současné přetrvávající sucho a změny v klimatickém systému vedou k vyvolání otázek vodohospodářů, jak do budoucna nakládat s vodními zdroji. Stále více se zkoumá projev změny klimatu v hydrologických řadách a jejich vliv na velikost zásobních funkcí nádrží. Již v dnešní době vedou dlouhodobé nedostatky zásobního objemu v nádržích k zavedení speciálních manipulací na vodních dílech. Cílem diplomové práce je provedení analýzy časové řady, resp. dekompozici hydrologické řady průměrných ročních a měsíčních průtoků. Vytvoření rozšířených hydrologických podkladů pomocí generátorů umělých průtokových řad a vypracování komplexní analýzy zásobního objemu bez uvažování ztrát i se zavedením ztrát vody z vodní hladiny výparem v programu UNCE RESERVOIR. Vytvořené průtokové řady se porovnají a vyhodnotí na základě statistických charakteristik a výsledků zásobních objemů s reálnou průtokovou řadou. Praktická aplikace je provedena na nádrži Vranov v povodí řeky Dyje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Autokorelační funkce, spektrální hustota, dekompozice, klouzavé průměry, statistické charakteristiky, vodohospodářské řešení, reálná průtoková řada, umělá průtoková řada, zásobní objem

ABSTRACT

The current persistent drought and changes in the climate system have raised water managers expert questions about how to manage water resources in the future. The manifestation of climate change in hydrological series and their influence on the magnitude of threats to the storage functions of reservoirs are more often investigated. Already today, long-term shortages of storage capacity in reservoirs lead to the introduction of special manipulations on water structures. The aim of the thesis is to perform the analysis of time series, respectively decomposition of hydrological series average annual and monthly discharges. Create extended hydrological bases using synthetic discharge series generators and develop a comprehensive analysis of storage volume without considering losses even with the introduction of losses from the water surface vapor in the UNCE RESERVOIR program. The created discharge series are compared and evaluated on the basis of statistical characteristics and reservoir storages results with the real discharge series. The practical app is conducted on the Vranov reservoir in the Dyje River Basin.

KEYWORDS

Autocorrelation function, spectral density, decomposition, moving averages, statistical characteristics, water management solution, real discharge series, synthetic discharge series, reservoir storage

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Lucie Vítková *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže Vranov*. Brno, 2019. 105 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže Vranov* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7. 1. 2020

Bc. Lucie Vítková

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže Vranov* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2020

Bc. Lucie Vítková

autor práce

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky, vstřícný přístup a čas věnovaný pro vypracování této diplomové práce.

Obsah

1	ÚVOD.....	1
1.1	Aktuální hydrologické výzkumy	2
1.2	Průtokové řady.....	4
1.2.1	Reálná průtoková řada.....	5
1.2.2	Umělá průtoková řada.....	5
2	CÍL PRÁCE	6
3	METODY	7
3.1	Struktura a analýza časových řad	7
3.1.1	Dekompozice časových řad	7
3.1.2	Metoda klouzavých průměrů.....	9
3.1.3	Autokorelační funkce	9
3.1.4	Spektrální hustota	11
3.2	Generátory umělých průtokových řad	11
3.3	Statistické charakteristiky	18
3.3.1	Střední hodnota	19
3.3.2	Disperze.....	19
3.3.3	Směrodatná odchylka	19
3.3.4	Koeficient variace	19
3.3.5	Koeficient asymetrie	20
3.3.6	Koeficient excese	20
3.4	Vodohospodářské řešení nádrže.....	21
3.4.1	Simulace nádrže	22
3.4.2	Simulační metoda pro vodohospodářské řešení (plnění/prázdňení nádrže)	22
3.4.3	Úloha $V_z = F_1(O_{pr}, P)$ pro $P = 100\%$	23
3.4.4	Program UNCE RESERVOIR.....	25
4	PRAKTICKÉ APLIKACE.....	26
4.1	Základní popis nádrže Vranov	27
4.1.1	Technické parametry.....	28
4.2	Reálné průtokové řady.....	29
4.2.1	Hlásný profil stanice Podhradí nad Dyjí.....	29
4.2.2	Hlásný profil stanice Vysočany na toku Želetavka	30
4.3	Analýza časových hydrologických řad průměrných ročních průtoků.....	33
4.3.1	Autokorelační funkce	33
4.3.2	Spektrální hustota	34

4.3.3	Trendová složka celkové reálné průtokové řady $Q_{r,real}$	35
4.3.4	Trendová složka reálné průtokové řady Dyje $Q_{r,Dyje}$ a Želetavky $Q_{r,Žel}$	37
4.3.5	Klouzavý průměr	39
4.3.6	Simulace plnění a prázdnění nádrže průměrných ročních průtoků.....	40
4.4	Analýza časových hydrologických řad průměrných měsíčních průtoků.....	43
4.4.1	Simulace plnění a prázdnění nádrže průměrných měsíčních průtoků	44
4.5	Statistická analýza reálné průtokové řady.....	48
4.5.1	Statistické charakteristiky reálné průtokové řady.....	48
4.6	Statistické charakteristiky umělých průtokových řad.....	52
4.7	Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže	74
4.7.1	Výpočet úlohy $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100 \%$	75
4.8	Hydrologická analýza umělé průtokové řady LNAR.....	84
5	SHRnutí VÝSLEDKŮ.....	87
6	ZÁVĚR.....	95
	BIBLIOGRAFIE.....	98
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	101
	SEZNAM TABULEK.....	102
	SEZNAM GRAFŮ.....	103

1 ÚVOD

Jednou z hlavních funkcí vodohospodářských nádrží s vodárenským účelem je zásobní funkce. Účelem zásobní funkce nádrže je zásobování obyvatelstva vodou a kompenzace nedostatkových průtoků v toku pod nádrží. Dále slouží k výrobě elektrické energie, k rekreaci, popřípadě k eliminaci následků ekologických havárií.

Začátkem 20. století se začalo v mnoha oborech mluvit o globálním oteplování. Teplotní záznamy se začaly vést již v roce 1850 a současná průměrná globální teplota je o 0,85 °C vyšší než ke konci 19. století. [1] Mění se podnebí může být ovlivňováno mnoha faktory. Jedním z nich je dopad lidské činnosti, spotřeba fosilních paliv, změna krajinného pokryvu spojená s odlesňováním k zemědělským účelům a těžbě dřeva nebo intenzivnější chov domácích zvířat. Do budoucna se počítá s ještě větším nárůstem teplot. Jedním z dopadů této globální změny mohou být častější a intenzivnější výskyty meteorologických a hydrologických extrémů v podobě povodní, sucha, bouří a vichřic. Změna klimatického režimu vyvolává i změny v rozložení srážek v průběhu hydrologického roku. Hlavním předpokladem je výskyt dlouhodobých suchých období střídajících se s obdobím přívalových dešťů, který už je v současné době pozorován. [2]

Jedním z nástrojů, jak přičinám globální změny čelit, je adaptace na změnu klimatu. V ČR je vytvořena sada dokumentů zahrnutá v "*Adaptační strategii ČR*", jejíž cílem je zmírnění dopadů změny klimatu přizpůsobením se této změně v co největší míře. Dokument "*Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*" obsahuje návrhy konkrétních adaptačních opatření, legislativní a částečnou analýzu. Zaměřuje se na oblasti, u kterých se předpokládají největší dopady na změnu klimatu. Tím jsou např. lesní hospodářství, zemědělství, vodní režim v krajině, urbanizovaná krajina a jiné. Dalším dokumentem je "*Národní akční plán adaptace na změnu klimatu*", který se zaměřuje na negativní dopady změny klimatu. Do toho je zahrnuto dlouhodobé sucho, povodně, zvyšování teploty a extrémní meteorologické jevy. Celá tato strategie se snaží zachovat co nejlepší životní podmínky a vylepšit vodohospodářský potenciál. [3]

V dřívější době se řešila výlučně jen problematika protipovodňové ochrany. V současnosti je tento problém v pozadí. Nyní je nejzávažnějším a nejdiskutovanějším tématem vedle povodní sucho. V obecném slova smyslu dochází k suchu při nedostatku srážek. Při záporné odchylce srážek od normálu během určitého časového období dochází k meteorologickému suchu. To následně vede k hydrologickému suchu, které je

zapříčiněno významným snížením hladin vodních toků. Při nedostatku vláhy pro plodiny pozorujeme zemědělské sucho. V neposlední řadě nastává socioekonomické sucho, které má vliv na kvalitu života. V tomto případě kapacita vodních zdrojů nebude schopná pokrýt potřeby uživatelů vody. [4] Období sucha se v České republice projevuje již od roku 2013. Na mnoha místech byly pozorovány poklesy hladin vodních stavů. Na významných vodních dílech se začaly objevovat hladové kameny, které informují o historických suchých obdobích v českých zemích. [5]

Hlavně otázka změny klimatického systému vede vodohospodářskou společnost k zamyšlení, jaké jsou nejlepší vhodná adaptační opatření a jakým způsobem do budoucna nakládat s vodními zdroji v rámci těchto opatření. Jednou z možností řešení daného stavu je výstavba nových nádrží, kdy je vytvořen nový akumulací potenciál nebo efektivnější využití funkčních objemů u stávajících nádrží. Úpravy zásobních objemů nádrží, výpočty směřující ke zdokonalení těchto výpočtů a zpřesnění výsledků, mají v současnosti rozhodně svá opodstatnění. Státní podnik Povodí Moravy, s.p. byl přinucen k zavedení speciálních manipulací na vybraných vodních dílech z důvodu dlouhodobého nedostatečného kapacitního zásobního objemu. Jednou z nich byla i nádrž Vranov v povodí řeky Dyje. V diplomové práci je řešen účinek vlivu ztrát vody na vodohospodářské řešení, dekompozice časových průtokových řad a vyhodnocení rozšířených podkladů pro komplexní analýzu nádrže Vranov.

1.1 Aktuální hydrologické výzkumy

V České republice se danou problematikou zabývá několik subjektů. Měřením průtoků a sledování vodních stavů se věnuje ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) a podniky povodí. V současné době se výzkumná hydrologická činnost stále více zaměřuje na analýzu dopadu klimatické změny a na vodní zdroje České republiky. Výzkum v dané oblasti dělají VÚV (Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka) ve spolupráci s ČHMÚ a podniky povodí. Dalšími subjekty věnující se dané problematice jsou ČVUT (České vysoké učení technické v Praze), Czech Globe, VUT (Vysoké učení technické v Brně) a další.

Český hydrometeorologický ústav je nejznámější orgán v České republice věnující se dané problematice. Hlavní činnosti ústavu je zřizování a provoz státní monitorovací a provozovací sítě pro sledování stavu atmosféry a hydrosféry. Má za úkol odborné zpracování výsledků pozorování, měření a monitorování při dodržení zásad legislativy EU. Zabývá se také vědecko-výzkumnou činností v oblasti zájmu. Poskytuje veřejnosti

jednak informace o stavu atmosféry a hydrosféry a zároveň výstrahy upozorňující na nebezpečné hydrologické jevy. [6]

Zpracováním hydrologických dat, hydrologickou bilancí, klimatickou změnou a dalšími tématy se zabývá výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. V posledních letech se stále více ústav orientuje na analýzu klimatické změny na vodní nádrže. Posuzují změny a trendy častějších výskytů extrémních hydrologických situací. To si vyžaduje nové metodické i odborné přístupy pro analýzu hydrologických a klimatologických dat. Potřebnost řešení je dokladována podporou ústředních orgánů. Vedle tradiční podpory Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zemědělství také výzkumy podporované Technologickou agenturou České republiky. [7]

Projekt RSCN věnovaný výsledkům projektu „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“, na němž se podílí VÚV TGM a ČHMÚ, měl za cíl vytvoření metodiky, která shrnuje zásadní principy posuzování dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a vodohospodářském plánování. Metodika vznikla na základě vyhodnocení změny klimatu a zjednodušení implementace požadavků na zohlednění dopadů změny klimatu v plánech povodí. Zabývá se hydrologickým modelováním, scénáři změny klimatu, nejistoty a plánování v oblasti vod. Jedná se zde o 129 povodí, pro něž jsou dostupná hydrologická data odpovídající ovlivnění klimatickou změnou. Záměrem tedy bylo porovnání jednotlivých studií dopadů změny klimatu a vybrat z dostupných simulací klimatických modelů (RCM) a simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ provedeny na ČHMÚ. [8]

Státní podnik Povodí Odry byl z důvodu extrémního sucha v dílčím povodí Horní Odry donucen pro provedení analýz hydrologických řad a prověření vodohospodářského řešení na základě posledních vědeckých poznatků o vývoji hydrologie v regionu v podmínkách pravděpodobné klimatické změny. Podnik Povodí Odry spolupracuje s ČHMÚ na vyhodnocení analýzy sucha aktualizací a prodloužením hydrologických řad charakterizující vodní díla. Na těchto datech byl odstraněn vliv člověka a tím vznikly ojedinělé hydrologické řady měsíčních průtoků bez významných antropogenních vlivů v republice. Daným opatřením na nádrži byla optimalizace a analýza hydrologické řady. Také generování umělých průtokových řad o délce 1 000 let, sestavení simulačního modelu, zpracování dispečerských grafů a případná úprava jednotlivých vodních zdrojů.

Výsledkem této analýzy je příprava nového manipulačního řádu, který je schopen plnit svoje funkce v zásobování vodou i nadlepšování průtoků v řekách. [9]

Dané problematice se již od 80. let věnuje i Vysoké učení technické v Brně (VUT), kde byly naprogramovány generátory (Růža, 1985) [10] přizpůsobené k vodohospodářským účelům. Dalším naprogramováním generátorů se zabýval (Pilař, 1988) [11] a dané generátory jsou použity v této diplomové práci. V dnešní době se problematikou a generováním umělých průtokových řad zabývá prof. Starý a doc. Marton [12]

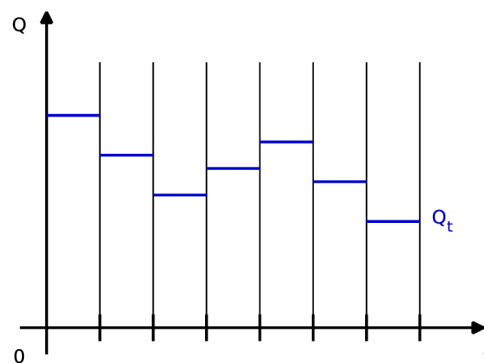
V současnosti je dobré provést analýzu hydrologických řad a vodohospodářského řešení na většině nádrží tak, aby bylo možné upravit manipulační řady a nalepšené odtoky, které by plnily svojí funkci. Důvodem jsou již zmiňované klimatické změny a přetrvávající sucha. Na nádrži Vranov nebyla daná analýza zatím provedena a zabývá se jí tato diplomová práce.

1.2 Průtokové řady

Režim vodních toků je odrazem kombinace klimatických a geografických činitelů v daném povodí. Jednotlivé průtoky se dlouhodobě pozorují ve vodočetných stanicích a poskytují data o časovém rozložení dlouhodobě pozorovaných průtoků vodních stavů. Pozorují se suché a vlhké roky, extrémní hodnoty průtoků, variační rozpětí a typický průběh v různých ročních obdobích nebo v jednotlivých měsících. Výsledkem pozorování získáme průběh vodního stavu neboli průtoky.

Průtoky, které zaznamenáváme:

- průměrné hodinové průtoky Q_h ,
- aritmetický průměr $Q_h =$ průměrné denní průtoky Q_d ,
- průměr $Q_d =$ průměrné měsíční průtoky Q_m ,
- průměr $Q_m =$ průměrné roční průtoky Q_r . [13]



Obrázek 1. Průběh průtokové řady Q_t [13]

Průtokové řady se podle způsobu jakým byly vytvořeny dělí na průtokové řady reálné a umělé. Reálná průtoková řada je získána buď měřením, nebo je odvozená pomocí metod vycházejících z analogie.

1.2.1 Reálná průtoková řada

Na základě měření nebo odvození průtoků vody ve vybraném profilu toku se určí okamžitý průtok vody. Pro měření je možné použít přímé nebo nepřímé postupy z hydrologie. Toto měření nám poskytuje základní hydrologický podklad, a to reálné průtokové řady. Čím delší průtokovou řadu získáme, tím spolehlivější tvoří podklad pro řešení dalších úloh. Důležitým faktorem je reprezentativnost řady, tj. schopnost, aby výsledky dosahovaly co nejvyšší věrohodnosti hydrologických poměrů v povodí. [14]

1.2.2 Umělá průtoková řada

Umělé průtokové řady umožňují důkladnější využití informací o průtoku prezentovanou reálnou průtokovou řadou. Mají vyjadřovat možnost budoucího průběhu posloupnosti průměrných průtoků jak měsíčních, tak ročních. Jejich hlavním předpokladem modelování je zachování statických charakteristik a autokorelační funkce reálné průtokové řady. Umělé řady mají poskytovat podklad pro vodohospodářské řešení řízení odtoků a zlepšovat zabezpečení nádrže. [13]

Pro získání umělých průtokových řad využíváme generátory umělých průtokových řad, jejichž cílem je matematické modelování a simulace chování náhodných veličin v čase. Podkladem pro generování slouží reálná průtoková řada s délkou pozorování, která je podstatně kratší než délka umělé průtokové řady. Ve vodním hospodářství se využívají převážně pro úlohy hospodaření s vodou v nádržích a ve vodohospodářských soustavách. [14] V diplomové práci nám umělé průtokové řady slouží jako podklad řešení úloh vodohospodářského řešení nádrže Vranov. Pro získání umělých průtokových řad byly využity generátory umělých průtokových řad popsané v kapitole 3.2.

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je nejprve podrobná analýza časových hydrologických řad průměrných ročních a měsíčních průměrných průtoků na přítoku do nádrže Vranov. Analýzou ročních průtoků se rozumí dekompozice časových řad, autokorelační funkce a spektrální hustota. Pro měsíční průtoky byly navíc vyhodnoceny statistické charakteristiky a sestrojeny čáry pravděpodobnosti překročení. Dále se diplomová práce zabývá generováním umělých průtokových řad a provedením komplexního výpočtu zásobního objemu nádrže Vranov s uvažováním změny množství výparu vody z vodní hladiny. Díky těmto rozšířeným hydrologickým podkladům je možné provést komplexní analýzu s ohledem na možné změny hydrologického cyklu a frekvenci výskytu sucha.

Jako vstupní data pro vypracování práce slouží reálná průtoková řada průměrných měsíčních průtoků poskytnuta ČHMÚ v Brně a umělé průtokové řady vygenerované z generátorů umělých průtokových řad LRM Soft a SYNTHE. Analýza časových řad byla provedena v programu MS Excel. Provedení simulačního modelu zásobního objemu bylo aplikováno v programu UNCE RESERVOIR. Zpracované hydrologické podklady jsou prezentovány v tabulkách a grafech diplomové práce.

3 METODY

Pro zpracování diplomové práce byly využity metody, které jsou popisovány v následujících kapitolách. Nejprve je popsána struktura a analýza časových řad, kde je rozebrána dekompozice řad, klouzavé průměry, autokorelační funkce a spektrální hustota. Dále se práce zaměřuje na popis generátorů pro vygenerování umělých průtokových řad a výpočet statistických charakteristik. Následuje výpočet vodohospodářského řešení, resp. výpočet zásobního objemu s uvažováním ztrát i bez uvažování ztrát vody z nádrže výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Dále je popsána simulace plnění/prázdňení nádrže.

3.1 Struktura a analýza časových řad

Jedna z nejdůležitějších úloh v hydrologii je právě analýza časové řady, její předpovídání a chování. Úspěšně se vyrovnává s popisem dynamických systémů. Časová řada vzniká díky dlouhodobému chronologickému pozorování v čase. Základem a cílem analýzy časových řad je porozumění konstrukce daného mechanismu sledovaných údajů.

U analýzy časových řad mohou vznikat specifické problémy. Jedním z nich mohou být právě pozorování v určitých nespojitých časových bodech, jelikož ne vždy je možnost volby časových bodů pozorování. Další chyby mohou vznikat například průměrováním pozorovaných hodnot. Pro přesnost vyhodnocování analýzy rozhoduje i délka pozorovaného období, tedy délka časové řady. Při rostoucím délce řady se zlepšuje množství informací pro její analýzu.

Pro volbu metody analýzy časové řady závisí několik faktorů. Například účel analýzy, typ časové řady nebo předchozí zkušenosti. Existuje několik základních postupů pro analýzu. Diplomová práce se zabývá dekompozicí časových řad. [15]

3.1.1 Dekompozice časových řad

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, dekompozice časových řad je základní úloha při řešení analýzy průtokových řad. Je to rozklad několika složek k lepšímu porozumění vlastností řady. Jednotlivé složky jsou:

- trend T_t ,
- sezónní (periodická) složka S_t ,
- cyklická složka C_t ,
- reziduální složka e_t .

Při provedení rozkladu se lépe identifikuje jednotlivé pravidelné chování řady než v původní nerozdělené. [15]

Podle vzájemného stavu se jednotlivé složky dělí na dekompozici adaptivní nebo multiplikativní. U adaptivní dekompozice se hodnota členů řady t v čase t rovná součtu všech složek. Složky se zde uvažují ve skutečných hodnotách.

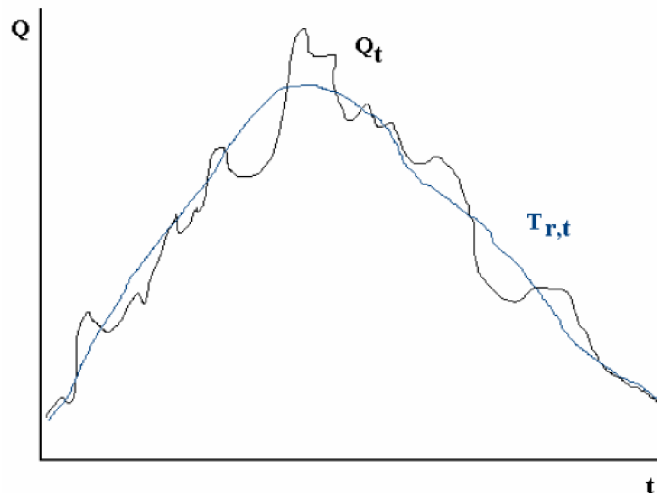
$$Q_t = T_t + S_t + C_t + e_t \quad (1)$$

Při multiplikativní dekompozici se složky uvažují v absolutní hodnotě zpravidla jen u trendu a ostatní složky se berou v absolutních hodnotách. U této dekompozice se hodnoty t rovnají součinu všech složek. [13]

$$t = T_t \cdot S_t \cdot C_t \cdot e_t \quad (2)$$

3.1.1.1 Trendová složka

Trendová složka odráží dlouhodobé změny průměrného chování časové řady, což je např. dlouhodobý růst nebo pokles. Proložení průběhu trendu neboli metoda grafická je nejjednodušší a nejrychlejší metoda. Dalším způsobem pro určení trendu je metoda klouzavých průměrů, kterou se zabývá kapitola 3.1.2. [13]



Obrázek 2. Trendová složka $T_{r,i}$ [13]

Na obrázku 2 je vyjádřena extrapolace a budoucí průběh časové řady.

3.1.2 Metoda klouzavých průměrů

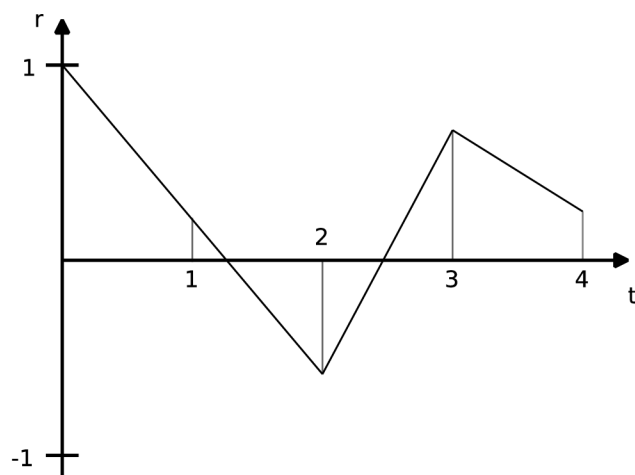
Metoda klouzavých průměrů je jedna ze dvou adaptivních způsobů k modelování trendové složky. Je schopna pracovat s trendovými složkami, které mění v čase globálně svůj charakter. Podstatou vyrovnání pomocí klouzavých průměrů je, že nahradíme posloupnost empirických pozorování řadou průměrů vypočítaných z těchto pozorování. Pro výpočet trendu metodou klouzavých průměrů je důležité určit řád a délku klouzavého průměru. Při výpočtu není vhodné používat úsek 2 členů se sudým počtem. Vyrovnaná hodnota by patřila doprostřed časového intervalu mezi okamžiky původních pozorování. Vzhledem k interpretaci výsledků je toto nevýhodné. [15]

Tabulka 1. Váhy klouzavých průměrů [15]

Délka	Řád	
	2./3.	4./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	$\frac{1}{143}(-11, 0, 16, 21, 24, 25, \dots)$	$\frac{1}{2431}(110, -198, -135, 110, 390, 600, 677 \dots)$

3.1.3 Autokorelační funkce

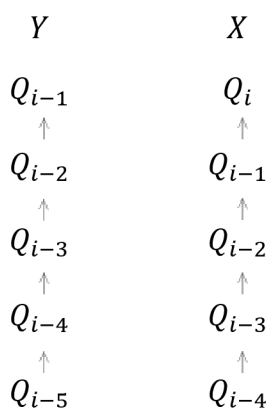
Autokorelační funkce se v praxi dá využít například při analýze periodického chování časové řady nebo při hledání závislosti zkoumané veličiny na svých předchozích hodnotách. Vnitřní struktura časové řady, kterou je popisována autokorelační funkce, nám určuje stupeň lineární závislosti, např. hodnoty průtoku na svých předchozích hodnotách. [13]



Obrázek 3. Průběh autokorelační funkce [13]

Koeficient korelace nabývá hodnot v intervalu od $\{-1, 1\}$. Řád autokorelační funkce určuje počet posunů τ sloupce Y . Při nulovém posunu je hodnota koeficientu korelace rovna nule z důvodu, že soubory X a Y jsou identické. Opakovaně se koeficient vypočte pro vzniklé soubory X a Y . Schéma pro vytvoření vstupů z průtokové řady a výpočet koeficientu je znázorněn v následujícím obrázku. Vztah výpočtu korelační funkce je vyjádřen ve vztahu (3). [13]

Posun o 1 člen nahoru



Obrázek 4. Schéma pro vytvoření vstupů z průtokové řady a výpočet koeficientu prvního řádu [13]

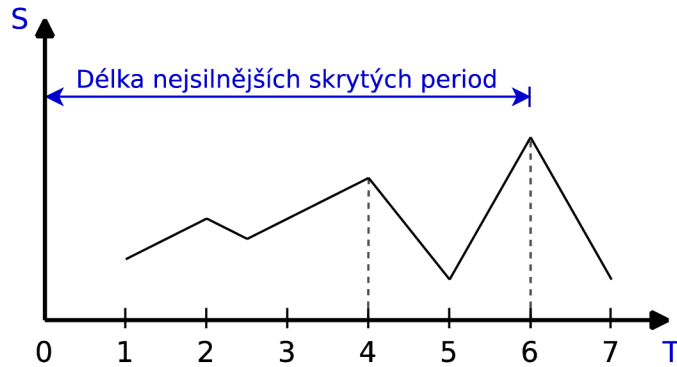
$$r(\tau) = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

kde:

- $r(\tau)$ koeficient korelace,
- τ řád autokorelační funkce, počet posunů,
- x_i, y_i prvky souboru x, y .

3.1.4 Spektrální hustota

Díky provádění spektrální analýzy je možné za pomoci statistických nástrojů jako je graf spektrální hustoty možné získat obraz intenzity zastoupení jednotlivých frekvencí ve zkoumané časové řadě. Pomocí toho se dají určit frekvence, které jsou v řadě nejméně zastoupeny. Dále spektrální hustota dovoluje porovnávat řady v rámci jednotlivých frekvencí, případně srovnání chování několika řad. [13]



Obrázek 5. Průběh spektrální hustoty [13]

Při provedení Fourierovy transformace autokorelační funkce získáme průběh spektrální hustoty. Ve vztahu (4) je uveden výpočet Fourierovy transformace autokorelační funkce. [13]

$$S(T) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ 1 + 2 \cdot \left[\sum_{\tau=1}^m \left(1 - \frac{\tau}{m+1} \right) \cdot r(\tau) \cdot \cos \frac{2\pi\tau}{T} \right] \right\} \quad (4)$$

kde:

$S(T)$	spektrální hustota,
T	délka periody,
$r(\tau)$	koeficient korelace,
τ	řád autokorelační funkce, počet posunů,
m	celkový počet kroků autokorelační funkce.

3.2 Generátory umělých průtokových řad

Z reálné průtokové řady byly generovány umělé průtokové řady z použitých generátorů vycházejících z Box – Jenkinsonovy [16] metodologie. Jsou schopny zpracovávat řady s navzájem závislými pozorováními. K sestavení generátoru byly použity kvazistacionární modely AR (Autoregresní model prvního řádu) a model ARMA (Pohyblivý autoregresní cyklus). Tyto modely popsal (Hirsch, 1979) [17] a slouží

k vodohospodářským účelům. Algoritmy použité pro vygenerování umělých průtokových řad pro zpracování diplomové práce popsal (Pilař, 1988) [11]. Generátor LRM, který byl vytvořen na základě lineárního regresního modelu důkladně popsali (Kos, Zeman, 1976). Použitý algoritmus v práci naprogramoval (Růža, 1985) [10]. Generátory byly již popsány v disertační práci (Marton, 2011) [18], která se danou problematikou zabývá.

Tato diplomová práce pracuje s generátorem LRM Soft a s programem SYNTHE, který je určen k tvorbě umělých průtokových řad měsíčních průtoků. Pomocí programu je také možno provádět jednoduchá statistická vyhodnocení generovaných výsledků, která je možno dále zobrazovat a ukládat do výstupních adresářů. Program obsahuje generátory umělých průtokových, které na podkladě reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků generují průběh umělé průtokové řady průměrných měsíčních průtoků. Použité generátory umělých průtokových řad jsou sestrojeny pomocí AR (Autoregresivní modely), MA (Modely klouzavých průměrů) a smíšené modely vycházející z principu kombinace AR a MA se nazývají ARMA, dále metody Lineárního regresního modelu. [19]

3.2.1.1 Obecné předpoklady pro sestrojení generátorů umělých průtokových řad

Při použití generátorů je vhodné rozlišovat tři pracovní úrovně (hladiny) X , Y a Z . Úroveň X odpovídá úrovni reálných průtoků Q .

Úroveň Y odpovídá úrovni transformovaných průtoků Q na předpokládané normální rozdělení pravděpodobnosti $N(\mu, \sigma)$, za použití logaritmicko – normální transformace. Lognormální transformací se odstraní asymetrie rozdělení průtoků, např. podle vzorce (5).

$$Y = \ln X \quad (5)$$

Úroveň Z odpovídá transformaci normálního rozdělení veličiny Y $N(\mu(Y), \sigma(Y))$ na normované (standardizované) normální rozdělení $N(0,1)$ podle vzorce (6).

$$Z = \frac{Y - \mu(Y)}{\sigma(Y)} \quad (6)$$

Na hladině Z se uplatňuje řada rovnic pro generování náhodné veličiny Z .

Z úrovně Z na úroveň Y se provede zpětný přepočít, z normovaného normálního rozdělení $N(0,1)$ na normální rozdělení $N(\mu(Y), \sigma(Y))$ podle vzorce (7).

$$Y = Z \cdot \sigma(Y) + \mu(Y) \quad (7)$$

Na úroveň X (úroveň průtoků Q) se provede zpětná transformace podle (8).

$$X = \exp(Y) \quad (8)$$

Kvalita generátorů umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků se hodnotí porovnáním statistických charakteristik a pravděpodobnostních funkcí (resp. pravděpodobnostních čar) průtokových řad reálných a umělých v jednotlivých měsících a porovnáním autokorelačních matic řad reálných a umělých.

3.2.1.2 Generátor umělých průtokových řad LNAR

System generujících rovnic je následující:

Na hladinu $Z_{i,t}$ se provede transformace z normálního rozdělení $N(\mu, \sigma)$ na normované normální rozdělení $N(0, 1)$. Na hladině $Z_{i,t}$ má generující rovnice následující tvar (9).

$$Z_{i,t} = \rho_{i,t} \cdot Z_{i-1,t} + \sqrt{(1 - \rho_{i,t})} \cdot \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

kde:

$\varepsilon_{i,t}$ náhodná odchylka

i 1, ..., 12 měsíců

t 1, ..., n roků, nekorelovaná s rozdělením $N(0,1)$.

Stanovení 36 parametrů $\mu_i(Y_{i,t})$, $\sigma_i(Y_{i,t})$, $\rho_{i,1}(Y_{i,t})$ pro $i = 1, \dots, 12$ měsíců bylo stanoveno podle následujících vztahů (10), (11), (12).

$$\mu_i = \exp\left(\left(\frac{1}{2} \cdot \sigma_i^2\right) + \mu_i\right) \quad (10)$$

$$\sigma_i = [\exp(2\sigma_i^2 + 2\mu_i) - \exp(\sigma_i^2 + 2\mu_i)] \quad (11)$$

$$\rho_{i,l} = \frac{\exp(\sigma_{i-l} \cdot \sigma_i \cdot \rho_{i,l}) - 1}{\sqrt{[\exp(\sigma_{i-l}^2) - 1] \cdot \sqrt{[\exp(\sigma_i^2) - 1]}}} \quad (12)$$

kde:

$\rho_{i,1}$ koeficient korelace, $i = 1, \dots, 12$ měsíců,

μ_i střední hodnota, $i = 1, \dots, 12$ měsíců,

σ_i směrodatná odchylka, $i = 1, \dots, 12$ měsíců.

Parametry $\mu_i(Y_{i,t})$, $\sigma_i(Y_{i,t})$, $\rho_{i,1}(Y_{i,t})$ byly řešeny pomocí soustavy nelineárních rovnic metodou zpětné vazby. Parametry byly stanoveny ze vstupní reálné průtokové řady.

3.2.1.3 Generátor umělých průtokových řad LNMA

Systém generujících rovnic je následující. Na hladinu $Z_{i,t}$ se provede transformace z normálního rozdělení $N(\mu, \sigma)$ na normované normální rozdělení $N(0,1)$. Na hladině $Z_{i,t}$ má generující rovnice následující tvar (13).

$$Z_{i,t} = \Phi \cdot Z_{i-1,t} + \beta_i \cdot \varepsilon_{i,t} - \theta_i \cdot \beta_{i-1} \cdot \varepsilon_{i-1,t} \quad (13)$$

kde:

$\varepsilon_{i,t}$ náhodná odchylka

i 1, ..., 12 měsíců

t 1, ..., n roků, nekorelovaná s rozdělením $N(0,1)$.

ϕ , β_i , θ_i parametry dané simultánními rovnicemi.

V modelu se řeší 49 parametrů. 36 parametrů $\mu_i(Y_{i,t})$, $\sigma_i(Y_{i,t})$, $\rho_{i,1}(Y_{i,t})$ bylo řešeno stejně jako u modelu LNAR pomocí soustavy nelineárních rovnic metodou zpětné vazby. Parametry byly stanoveny ze vstupní reálné průtokové řady. Zbývajících 25 parametrů ϕ , β_i , θ_i bylo popsáno pomocí simultánních rovnic (14), (15).

$$\rho_{i,l} = \Phi - \theta_i \cdot \beta_{i-l}^2 \quad (14)$$

$$l = \Phi \cdot \rho_{i,l} + \beta_i^2 - \theta_i \cdot \Phi \cdot \beta_{i-l}^2 + \theta_i^2 \cdot \beta_i^2 \quad (15)$$

Kde $\rho_{i,1}$ koeficient korelace je řešen stejně jako (12). Jakákoliv sestava 25 hodnot parametrů ρ , které vyhovují těmto 24 rovnicím, zaručuje shodné statistické charakteristiky μ_i , σ_i , $\rho_{i,1}$ reálné a umělé průtokové řady.

Systém generujících rovnic (14) a (15) je neurčitý, proto je nutno před jeho řešením stanovit parametr ϕ . Sériová korelační struktura modelu je dána (16).

$$\bar{\rho}_{i,j} = \Phi^{j-1} - \rho_{i-j+1,l} \quad (16)$$

kde:

$\bar{\rho}_{i,j}$ teoretický koeficient korelace,

i 1, ..., 12 měsíc,

j 1, ..., 12 pro předešlý měsíc k měsíci i .

V modelu je nutno označit měsíce -11, -10, ..., 0 jako měsíce 1, 2, ..., 12. Odhady teoretického koeficientu korelace $\bar{\rho}_{i,j}$ provedené z reálné průtokové řady pro řád 2, 3, ..., 12 jsou stanoveny podle (17).

$$\rho_{i,j} = \frac{\exp(\sigma_i \cdot \sigma_{i-j} \cdot \bar{\rho}_{i,j}) - 1}{[\exp(\sigma_i^2) - 1]^{\frac{1}{2}} \cdot [\exp(\sigma_{i-j}^2) - 1]^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

kde:

$\rho_{i,j}$ koeficient korelace j -tého řádu z reálné průtokové řady pro i -tý měsíc,

i 1, ..., 12 měsíců,

j 2, 3, ..., 12 řád.

Parametr ϕ je vybrán tak, že se minimalizuje součet čtverců odchylek mezi $\bar{\rho}_{i,j}$ a $\rho_{i,j}$ pro všechny měsíce a pro všechny řády od $j = 2$ po $j = 12$. Úloha se řeší tak, že se pro hodnoty parametru $\phi = 0/0,05/0,95$ řeší vztah (18).

$$F(\phi) = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=2}^{12} (\bar{\rho} - \phi^{j-1} \cdot \rho_{i-j+1,i})^2 \quad (18)$$

Ze získaného souboru $F(\phi)$ se vybere ϕ takové, pro které platí $F(\phi) \rightarrow \min$. Na závěr se provede zpětná transformace podle (7) a (8) na hladinu $X_{i,t}$.

3.2.1.4 Generátor umělých průtokových řad LRM

Použitý lineární regresní model vychází z předpokladu existence systému Markovských řetězců vyšších řádů. Prvním krokem k sestavení generátoru je opět provedení logaritmické transformace vstupní průtokové řady podle (19).

$$y_i = \ln(Q_i - Q_{min}) \quad (19)$$

kde:

Q_i jsou měsíční průtoky v měsíci, pro $i = 1, \dots, 12$.

Q_{min} je minimální hodnota průtoky ze vstupní průtokové řady, kde Q_{min} je vypočteno pro každý měsíc řady podle:

$$Q_{min} = 0,4 \cdot Q_{min,mes} \quad (20)$$

Dále jsou hodnoty y_i standardizovány, je provedena transformace z normálního rozdělení na rozdělení normované normální. Podle obecného vzorce (21).

$$z_i = \frac{y_i - \mu(y_i)}{\sigma(y_i)} \quad (21)$$

kde:

$\mu(y_i)$ je střední hodnota vypočtená z logaritmované řady průměrných měsíčních průtoků, pro $i = 1, \dots, 12$.

$\sigma(y_i)$ je směrodatná odchylka stanovená z řady y , pro $i = 1, \dots, 12$.

$$z_i = b_1 \cdot z_{i-1} + b_2 \cdot z_{i-2} + b_3 \cdot z_{i-3} + \dots + b_n \cdot z_{i-n} + f \cdot d_i \quad (22)$$

kde:

z_i jsou transformované a standardizované hodnoty průměrných měsíčních průtoků, pro $i = 1, \dots, 12$.

b_j jsou hodnoty regresních koeficientů, pro $j = 1, \dots, n$.

d_i je náhodné číslo generované pro normované normální rozdělení $N(0,1)$.

f je směrodatná odchylka regresního odhadu.

Regresní koeficienty se počítají pomocí koeficientů korelace a směrodatné odchylky a určí se podle vztahu (23).

$$b_j = \beta_j \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_j} \quad (23)$$

kde:

b_j jsou hodnoty regresních koeficientů, pro $j = 1, \dots, k$

σ_y je směrodatná odchylka závislé proměnné

σ_j je směrodatná odchylka j -té nezávislé proměnné, pro $j = 1, \dots, k$

β_j je váhový koeficient určený podle (24).

$$\beta_j = \sum_{i=1}^k r_{iy} \cdot (r_{ij})^{-1} \quad (24)$$

kde:

r_{iy} jsou hodnoty korelačních koeficientů mezi i -tou nezávislou proměnnou a závisle proměnnou,

$(r_{ij})^{-1}$ jsou inverzní hodnoty k hodnotě korelačních koeficientů r_{ij} , kde $i, j = 1, \dots, k$ jsou indexy nezávisle proměnných.

Váhový koeficient β představuje podíl dvou determinantů k-tého stupně, prvky matice jsou koeficienty korelace r_{jk} odpovídající pořadí řádku a sloupce matice. Hlavní diagonálu matice tvoří jedničky.

Absolutní člen se vypočte z rovnice (25).

$$b_o = \bar{Y} - \sum_{i=1}^k b_j \bar{X}_j \quad (25)$$

kde:

\bar{Y} je průměr závislé proměnné,

\bar{X} je průměr j -té nezávislé proměnné.

$$R^2 = \sum_{i=1}^k \beta_j \cdot r_{iy} \quad (26)$$

Na základě součtu čtverců odchylek od průměru pro závisle proměnnou D_{yy} , která se zavádí na vstupu podprogramu a koeficientu determinace R^2 , se vypočte hodnota AR jako (27):

$$AR = R^2 \cdot D_{yy} \quad (27)$$

a hodnota DR jako (28).

$$R = D_{yy} - AR \quad (28)$$

Parametry AR a DR slouží jako pomocné hodnoty k výpočtům hodnoty F-testu podle vzorce (29).

$$F = \frac{\left(\frac{AR}{k}\right)}{\left(\frac{DR}{(n-k-1)}\right)} \quad (29)$$

Kde k je definovaná jako délka regresního rozvoje a n je počet pozorování.

Směrodatná odchylka regrese se určí jako odmocnina z hodnoty $DR/(n-k-1)$. Směrodatná odchylka koeficientu korelace se určí jako odmocnina z hodnoty (30).

$$\sigma_{b_j}^2 = \frac{(r_{jj})^{-1} \cdot DR}{D_{jj} \cdot (n-k-1)} \quad (30)$$

Hodnoty t-testu se vypočtou jako (31).

$$t_j = \frac{b_j}{\sigma_{b_j}} \quad (31)$$

Hodnoty t-testů umožní posoudit oprávněnost jednotlivých regresních koeficientů v regresní funkci. Celkový vliv všech nezávisle proměnných, nebo skupiny nezávisle proměnných umožní posoudit F-testy.

Hodnoty generované na úrovni lineární regresní rovnice (22) je nutné na závěr transformovat zpět. Zpětnou transformací se získají syntetické průtoky na úrovni Q_i . Transformace je provedena podle rovnic (7) a (8).

3.2.1.5 Generátor umělých průtokových řad LTAR

U generátoru LTAR provedeme transformaci reálné průtokové řady z hladiny $X_{i,t}$ na $Y_{i,t}$ podle (5). Z hladiny $Y_{i,t}$ na $Z_{i,t}$ se provede přepočítání podle (6). Na hladině $Z_{i,t}$ je systém generujících rovnic shodný jako u generátoru LNAR. Rozdíl je ve způsobu stanovení 36 parametrů, kde $\mu_i(Y_{i,t})$, $\sigma_i(Y_{i,t})$, $\rho_{i,1}(Y_{i,t})$ jsou střední hodnota, směrodatná odchylka a koeficient korelace prvního řádu logaritmu členů reálné řady. Na závěr se provede zpětná transformace podle (7) a (8).

3.2.1.6 Generátor umělých průtokových řad LTMA

U generátoru LTMA provedeme transformaci reálné průtokové řady z hladiny $X_{i,t}$ na $Y_{i,t}$ podle (5). Z hladiny $Y_{i,t}$ na $Z_{i,t}$ se provede přepočítání podle (6). Generující rovnice na hladině $Z_{i,t}$ jsou identické s generátorem LNMA. Rozdíl spočívá v metodě stanovení 49 parametrů generujících rovnic. Parametry $\mu_i(Y_{i,t})$ střední hodnota, $\sigma_i(Y_{i,t})$ směrodatná odchylka, $\rho_{i,1}(Y_{i,t})$ koeficient korelace a $\bar{\rho}_{i,j}$ teoretický koeficient korelace jsou stanoveny z prvního řádu logaritmu členů reálné řady. Na závěr se provede zpětná transformace podle (7) a (8).

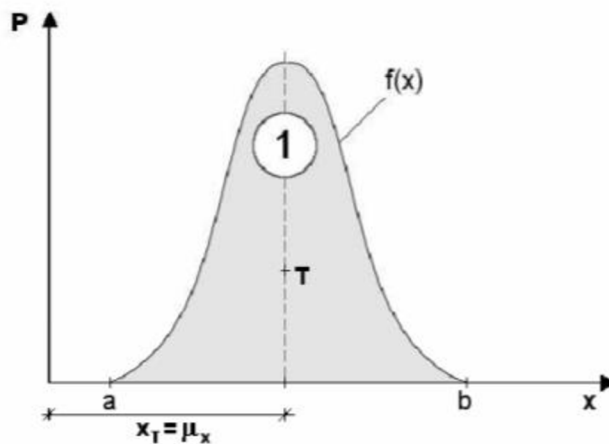
3.3 Statistické charakteristiky

Statistické charakteristiky jsou funkce používané v hydrologii pro popis základního souboru hydrologických dat. Nejčastěji používané statistické charakteristiky jsou střední hodnota, disperze, směrodatná odchylka, koeficient variace, asymetrie a koeficient špičatosti. V této práci byly vyhodnoceny všechny zmíněné charakteristiky. Následující podkapitoly rozebírá prof. Starý HYDROLOGIE: MODUL 01 [13] a byly již popsány i v bakalářské práci. [20]

3.3.1 Střední hodnota

Střední hodnota se značí $\mu(x)$ a je to hodnota prvního obecného momentu. Patří k tzv. charakteristikám polohy, jejíž hodnota je x-ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti.

$$\mu(x) = \mu(x) = \mu[x] = m_1[x] = \int_a^b xf(x)dx \quad (32)$$



Obrázek 6. Střední hodnota je x-ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti [13]

3.3.2 Disperze

Disperze neboli rozptyl se značí $D(x)$ a je to hodnota druhého centrálního momentu. Pokud se hodnota disperze blíží nule, je tvar grafu hustoty pravděpodobnosti úzký a špičatý. Pokud naopak hodnota disperze roste do nekonečna, je tvar grafu plochý a nízký.

$$Dx = D(x) = D[x] = M_2(x) = m_2(x - \mu_x) = \int_a^b (x - \mu_x)^2 f(x)dx \quad (33)$$

3.3.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka, jinak nazývaná střední kvadratická odchylka, se značí σ_x a využívá se pro popis souborů.

$$\sigma_x = \sigma(x) = \sigma[x] = \sqrt{D_x} \quad (34)$$

3.3.4 Koeficient variace

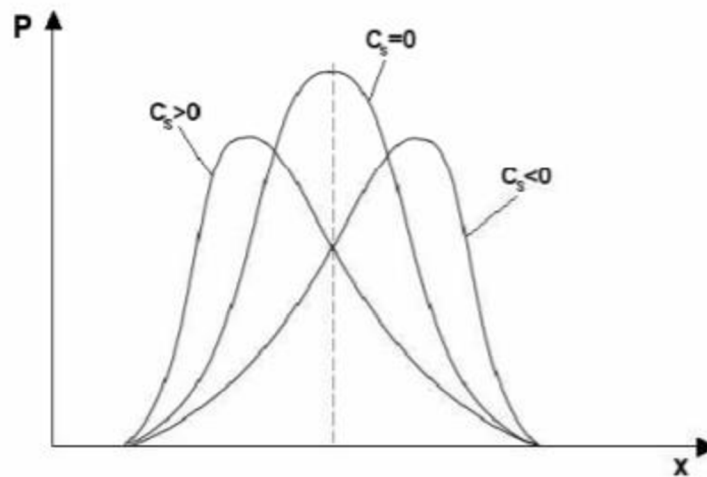
Jedná se o procentuálně vyjádřenou bezrozměrnou charakteristiku $C_{v,x}$, která je definovaná jako podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty.

$$C_{v,x} = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (35)$$

3.3.5 Koeficient asymetrie

Koeficient asymetrie $C_{s,x}$ neboli šikmost se určí jako podíl třetího centrálního momentu a třetí mocniny směrodatné odchylky. Vyjadřuje míru asymetrie okolo aritmetického průměru.

$$C_{s,x} = \frac{M_3(x)}{\sigma^3} \quad (36)$$



Obrázek 7. Koeficient asymetrie odpovídá o naklonění grafu hustoty pravděpodobnosti [13]

3.3.6 Koeficient excese

Koeficient excese E_x neboli špičatosti je mírou koncentrace dat kolem určité hodnoty nebo skupiny hodnot ve srovnání s určitým definovaným rozdělením veličiny.

$$E_x = \frac{M_4(x)}{\sigma^4(x)} - 3 \quad (37)$$

Z důvodu malého počtu realizací se v hydrologické praxi využívá nejvýše do čtvrtého počtu realizací $M_4(x)$, ovšem musí být k dispozici výsledná statistická charakteristika s maximální chybou $\pm 10\%$.

Tabulka 2. Nutný počet realizací pro odhad statistické charakteristiky s chybou $\pm 10\%$

Statistické charakteristiky	Počet realizací
μ_x	20
$D_x, \sigma_x, C_{v,x}$	40
$C_{s,x}$	80
E_x	300
$M_5[x]$	1200

3.4 Vodohospodářské řešení nádrže

Vodohospodářské řešení je jedním z hlavních podkladů pro návrh parametrů nádrže a její provoz. Je to soubor úvah početních nebo grafických řešení, zabývajících se řízením odtoku z nádrže. Zajišťují se parametry nádrže a funkční zařízení, které jsou potřebné k požadovaným účinkům. Zahrnujeme sem především vyšetření zásobního objemu pro plnění funkcí. Ty jsou vyjádřeny vztahem mezi objemem zásobního prostoru, odtokem z nádrže a zabezpečeností odtoku. Další důvod vodohospodářského řešení je například zjišťování ochranného objemu potřebného k povodňovému řízení odtoku. Následně zde může být zahrnuto řešení objemu stálého nadržení, vliv nádrže na vodní režim toku, požadavky na kapacitu a další. [14]

Při vodohospodářském řešení zásobního objemu nádrže hledáme vztah mezi třemi veličinami časového průběhu přítoku vody $Q(t)$, který je znám chronologickou řadou:

- O_p – hodnota nalepšeného odtoku vody,
- V_z – velikost zásobního objemu nádrže,
- P – zabezpečenost nalepšeného odtoku,

přičemž ten je vyjádřen zabezpečeností podle opakování P_o , zabezpečeností podle trvání P_t a zabezpečeností podle dodávky vody P_D . Ze tří veličin O_p , V_z a P jsou vždy dvě zadané a hledá se třetí nezadaná veličina. Tím vzniknou základní typy úloh používající se v praxi. Jedná se o Úlohu č. 1, kde zásobní prostor V_z je funkcí požadovaného odtoku O_p a zabezpečenosti P , tedy $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100\%$. V Úloze č. 2 je zabezpečenost P funkcí požadovaného odtoku O_p a zásobního objemu V_z , tedy $P = F_2(O_p, V_z)$. Úlohu č. 3, kde zásobní prostor V_z je funkcí požadovaného odtoku O_p a zabezpečenosti P , tedy zásobní objem $V_z = F_1(O_p, P)$ tentokrát pro $P < 100\%$ a Úlohu č. 4, kde požadovaný odtok O_p je funkcí zásobního prostoru V_z a zabezpečenosti P , tedy $O_p = F_3(V_z, P)$ pro $P = 100\%$. [20]

3.4.1 Simulace nádrže

Simulací rozumíme techniku zvládající vyhodnotit nějaké rozhodnutí bez uskutečnění v praxi. Pokud se rozhodneme toto aplikovat na zásobní funkci nádrže, můžeme jí popsat jako matematickou techniku napodobující posloupnost aritmetických a logických algoritmů provozu nádrže ve sledovaném časovém intervalu.

Pokud chceme provádět vlastní simulaci, je vhodné znát chronologickou řadu průměrných měsíčních průtoků podle délky voleného období, ve kterém simulaci provádíme. Shodný způsob řešení je pro reálnou průtokovou řadu i pro umělou průtokovou řadu. Rozdíl je pouze v použití vstupní chronologické řady. Během simulace je důležité sledování průběhu kritériálních funkcí. Ty jsou tvořeny zejména technickými veličinami, ale i ekonomickými veličinami, popřípadě kombinací obou veličin.

Hlavním principem simulačního modelu je volba hledané veličiny v dané oblasti a v určitém kroku, který do řešení spadá jako parametr. Pro vyhodnocení sledovaného kritéria volíme hodnotu parametru a opakovaně simulujeme novou variantu provozu nádrže. Kritérium, které se shoduje přesně se zadanou hodnotou, vybereme jako správnou variantu. V ní zvolený parametr se stává výsledkem. [14]

3.4.2 Simulační metoda pro vodohospodářské řešení (plnění/prázdňení nádrže)

Daná metoda se dá provádět:

- v návrhovém období,
- v návrhových rocích.

V návrhovém období je možné provádět s víceletým řízením odtoku. Vstupní data tvoří reálná nebo umělá průtoková řada měsíčních průtoků. Reálná průtoková řada by měla obsahovat minimální délku 30 let a umělá průtoková řada by měla mít délku alespoň 500 až 1000 let. Tím bychom měli dosáhnout přijatelné spolehlivosti výsledků. Řešení v návrhových rocích se využívá u méně významných nádrží převážně lokálního významu.

Návrhovým rokem při ročním řízení odtoku se považuje vodohospodářský rok, který má počátek při začátku plnění nádrže. U nás se volí první duben a v horských oblastech první květen. Počáteční podmínkou je plná nádrž, kdy je nutné provést řešení vždy ve dvou stejných návrhových letech. Ten druhý slouží jako test, zda je vodné období postačující pro naplnění nádrže.

Prázdňení nádrže, které je vhodné pro úplné roční vyrovnání, je možné rovněž provádět při řešení v navrhovaném vodohospodářském roce. Základním úkolem metody je nalezení zásobního objemu a vykreslení plnění a prázdňení nádrže. Dán je nalepšený odtok O_p při zabezpečení $P = 100 \%$. A tento nalepšený průměrný odtok je v daném případě roven aritmetickému průměru z přítoků v jednotlivých měsících návrhového roku. Postup výpočtu je znázorněn v tabulce 3.

Tabulka 3. Plnění a prázdňení nádrže [14]

1	2	3	4	5	6	7	8
i	rok	měsíc	O_p [m ³ s ⁻¹]	Q [m ³ s ⁻¹]	$(O_p - Q) \cdot \Delta t$ [m ³]	$\Sigma (O_p - Q) \cdot \Delta t$ [m ³]	Max/min plnění

Sloupec 7 nám znázorňuje danými hodnotami plnění a prázdňení nádrže, které vzniknou sčítáním údajů ze sloupce 6. Strategie řízení je jednoznačná. Odtok je trvale roven O_p . Hledaný zásobní objem je maximální hodnota plnění nádrže. Simulace se dá vyřešit i grafickým způsobem, ten však nebyl součástí praktické aplikace této diplomové práce. [14]

3.4.3 Úloha $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100 \%$

Jde o úlohu, kde zásobní prostor V_z je funkcí požadovaného odtoku O_p a zabezpečení P , tedy $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100 \%$ a byla již popisována i v bakalářské práci [20].

Řešení vztahu mezi V_z , O_p , P simulační metodou je možno provádět početně nebo graficky. K pochopení principu řešených úloh vyniká svojí přehledností a názorností grafické řešení. Početní řešení je méně přehledné, ale díky velkému množství opakování výpočtů je zvláště vhodné při použití výpočetní techniky. Grafické i početní řešení jsou shodná, jedná se pouze o odlišnou interpretaci stejného postupu.

Pro úlohu platí, že se provádí v jediné variantě jednorázovou simulací provozu nádrže. Počáteční podmínkou je plná nádrž. Řešení úlohy je znázorněno v tabulce 4.

Tabulka 4. Výpočet Úlohy č. 1 $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100\%$

1	2	3	4	5	6	7	8
i	rok	měsíc	O_p [m ³ s ⁻¹]	Q [m ³ s ⁻¹]	O [m ³]	$(O_p - Q) \cdot \Delta t$ [m ³]	$\Sigma (O_p - Q) \cdot \Delta t$ [m ³]

Do tabulky 4 jsou zadávány vstupní data, ve sloupci č. 4 nalepšený odtok O_p . Pátý sloupec je prezentován chronologickou měsíční průtokovou řadou a šestý prezentuje hodnoty skutečných odtoků O z nádrže. V sedmém sloupci je provedena bilance mezi požadovaným nalepšeným odtokovým množstvím $O_p \cdot \Delta t$ a přítokovým množstvím $Q \cdot \Delta t$. Poslední sloupec nám znázorňuje simulaci prázdnění nádrže.

Pokud v daném měsíci je $O_p > Q$, nádrž se prázdní. Naopak pokud $O_p < Q$, nádrž se plní. Na konci každého měsíce neboli v každém bilančním kroku se pro Úlohu č. 1 stanovuje tzv. simulace prázdnění nádrže. Změna prázdnění nádrže na konci každého měsíce je získána jako dílčí bilance $(O_p - Q) \cdot \Delta t$ a přičteme ji ke stavu prázdnění nádrže na konci předcházejícího měsíce $\Sigma (O_p - Q) \cdot \Delta t$. Pokud je nádrž plná a přítok Q je v daném měsíci větší než požadovaný nalepšený odtok O_p , pak je odtok roven přítoku. V tomto případě je $\Sigma (O_p - Q) \cdot \Delta t = 0$. Vztah je roven 0 i v případě, že dojde k naplnění již v průběhu měsíce. Zásobním objemem V_z se zabezpečností $P = 100\%$ je požadovaná maximální hodnota $\Sigma (O_p - Q) \cdot \Delta t$ provedením simulace prázdnění nádrže v řešeném časovém období.

Základ pro simulační model nádrže pro výpočet Úlohy č. 1 vodohospodářského zásobního objemu je upravená základní rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (38).

$$0 \leq \sum_{i=0}^k (O_i - Q_i) \Delta t + (O_{i+1} - Q_{i+1}) \Delta t \quad (38)$$

kde:

- O_i odtok vody z nádrže [m³s⁻¹] pro $i = 1, 2, 3, \dots, n$,
- Q_i přítok vody do nádrže [m³s⁻¹] pro $i = 1, 2, 3, \dots, n$,
- Δt časový krok výpočtu jeden měsíc.

V kroku $i+1$ je hodnota O_{i+1} nejprve nahrazena hodnotou požadovaného nalepšeného odtoku O_p . Časový průběh vyčíslované sumy pravé strany rovnice znázorňuje průběh prázdnění zásobního objemu nádrže po časových krocích $i = 1, \dots, k$. Pro $i = 0$ je třeba zadat počáteční podmínku řešení.

Nerovnost (38) je omezená z levé strany hodnotou 0, což značí plný zásobní objem nádrže. Výpočtem hodnoty výrazu je získáno momentální prázdnění zásobního objemu $V'_{z,i+1}$. Dosažením maximální hodnoty prázdnění nádrže za řešené období byl získán hledaný zásobní objem. Nerovnost (38) tedy počítá velikost zásobního objemu nádrže V_z pro zabezpečení $P = 100\%$ odtoku vody z nádrže. Znamená to, že v nádrži při řešeném období nevznikne nedodávka vody, která by byla způsobena nedostatečným přítokem vody do nádrže. Nedostatečný přítok ovlivňují málo vodné či suché období. [20]

3.4.4 Program UNCE RESERVOIR

K výpočtu zásobního objemu s uvažováním ztrát vody z nádrže a nejistot parametrů vstupujících do řešení slouží program UNCE RESERVOIR. Podstatou výpočtu je stanovení maximálního zásobního objemu při 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže a úloha, kdy je stanovena zabezpečení podle trvání a množství nedodané vody. Vychází to ze základní rovnice nádrže v součtovém tvaru a simulačního modelu průběhu plnění a prázdnění nádrže. Jednoduchá simulace je základem výpočtu provozu nádrže. Výsledkem jsou poté velikosti zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát, ale i bez uvažování ztrát výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Dále hodnoty objemu nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat. Možnost zavedení ztrát vody výparem z vodní hladiny do simulace výpočtu zásobního objemu umožní provést analýzu vlivu výparu na velikost zásobního objemu nádrže. [21]

4 PRAKTICKÉ APLIKACE

V praktické aplikaci bude diplomová práce volně navazovat na mojí bakalářskou práci, která nese název Vodohospodářské řešení vybrané vodní nádrže. Bakalářská práce slouží jako vhodný podklad pro následující zpracování této diplomové práce, která je členěna do několika následujících kapitol.

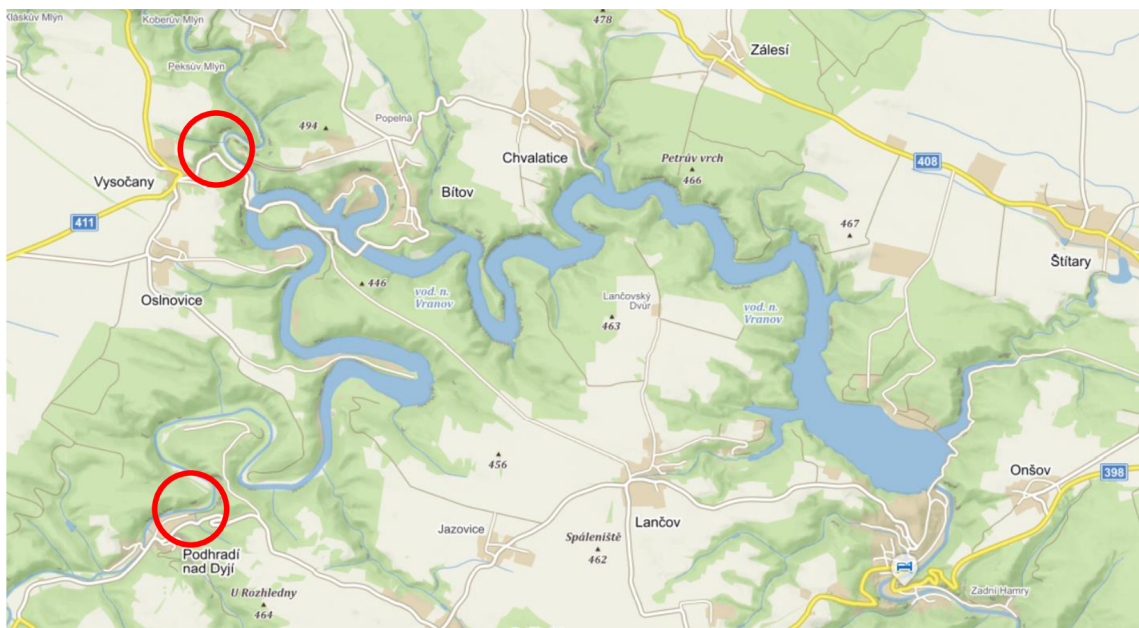
V první kapitole se diplomová práce zabývá nejprve analýzou průtokových řad průměrných ročních průtoků za pomoci programu MS Excel. Snahou je rozebrání průtokových řad z hlásného profilu stanice Podhradí pod Dyjí a z hlásného profilu Vysočany na toku Želetavka. Z obou profilů byla poskytnuta data reálných průtokových řad z ČHMÚ. Následně z toho byla vytvořena celková reálná průtoková řada pro nádrž Vranov. Pro analýzu byla využita autokorelační funkce, spektrální hustota i metoda klouzavých průměrů. Tyto metody využíváme pro hledání skrytých period v časových řadách a pro detailní rozebrání. Bude zde také provedena simulace plnění/prázdňení nádrže, kde by se mělo ukázat chování nádrže při málo vodných a obdobích zvýšených průtoků. Další kapitola rozebírá podobnou analýzu ovšem s měsíčními průtoky.

Následující část práce se zaměří na rozšíření hydrologických podkladů, kterými jsou umělé průtokové řady vygenerované z pěti generátorů. Nejprve se provede detailní rozbor statistických charakteristik pro reálnou průtokovou řadu. Popisujícími charakteristikami jsou střední hodnota, disperze, směrodatná odchylka, koeficient variace, koeficient asymetrie a koeficient excese. Poté se detailní analýza zacílí na umělé průtokové řady z generátorů LNAR, LNMA, LRM, LTAR a LTMA. Pomocí vykreslení čar pravděpodobnosti překročení a výpočtu statistických charakteristik se vyhodnotí úspěšnost daných generátorů.

Vodohospodářským řešením neboli výpočtem zásobního objemu v závislosti na nalepšeném odtoku nádrže Vranov je další analýzou, kterou se diplomová práce zabývá. Analýza je provedena pro 100 % zabezpečení bez uvažování ztrát, tak zároveň se zavedením ztrát vody z nádrže. Ztrátami z nádrže se uvažuje výpar z vodní hladiny. Průměrná roční hodnota výparu na nádrži Vranov odpovídá hodnotě $E_a = 750$ mm. Do výpočtu dále byly zahrnuty hodnoty výparu od 600 mm do 900 mm. Výpar hodnot nižší než současná hodnota výparu 750 mm je pouze orientační. Muselo by dojít k poklesu průměrných teplot, což se do budoucna neočekává. Důležitější roli mají hodnoty výparu 800 mm a 900 mm, jelikož se do budoucna dá předpokládat s variantou zvyšujícího

výparu. Výpočet zásobního objemu je vyhodnocen v programu UNCE RESERVOIR. Celá analýza je provedena opět pro reálnou průtokovou řadu, se kterou budou porovnány umělé průtokové řady generované z generátorů umělých průtokových řad. Závěrem kapitoly se posoudí výsledky s manipulačním řádem a také s jednotlivými umělými řadami.

Poslední kapitolou v diplomové práci je hydrologická analýza výsledné umělé průtokové řady. Umělá průtoková řada s nejhodnějšími výsledky statistických charakteristik, tak výpočtu zásobního objemu v závislosti na nalepšeném odtoku, bude důkladně analyzována z hydrologického hlediska. Autokorelační funkce a trendové složky se porovnájí s reálnou průtokovou řadou. Dál se vyhledají lokální extrémy a skryté periody, které by se mohli projevit v závislosti na reálné průtokové řadě. Nakonec se provede kompletní shrnutí a vyhodnocení výsledků z celé diplomové práce.



Obrázek 8. Vodní nádrž Vranov a znázornění měrných profilů Podhradí nad Dyjí a Vysočany [22]

4.1 Základní popis nádrže Vranov

Vodní nádrž Vranov leží na 175,41 km řeky Dyje a klikatí se téměř na délce 30 km od Podhradí nad Dyjí až po Vranov. Hráz zadržuje téměř 132,6 milionů m³ vody a zatopená plocha dosahuje rozlohy 762,5 ha. Průměrný dlouhodobý roční průtok je udáván 9,740 m³s⁻¹. Její hráze je betonová gravitační a výška hráze je 59,9 m s délkou v koruně 290,5 m. Uvedení do provozu nastalo v roce 1934 a správcem nádrže je Povodí Moravy. [23]

Povodí Dyje, ve kterém se vodní nádrž Vranov nachází, má rozlohu 13 419 km². Rozkládá se v jižní části České republiky i v jihozápadní části Moravy. Významným tokem v povodí je řeka Dyje. Povodí má vějířovitý tvar a odvádí vodu z východní a jižní části Českomoravské vrchoviny, z části severního Rakouska a také ze svahů Žďárských vrchů. [24]

Nádrž plní hned několik funkcí. Jedním z prvních je zásobárna vody, která pitnou vodou zásobuje část znojemského a část třebíčského okresu. Dalším účelem je výroba elektrické energie. O to se starají tři Francisovi turbíny s průtokem 3 x 15 m³s⁻¹, každá s výkonem 5400 kW. Provozovatelem elektrárny je energetická společnost E.ON Česká republika, s.r.o. Dále jako občasná regulace přívalových vod a zajištění minimálních průtoků. Nádrž byla vystavěna i z důvodů rekreace, vodních sportů a plavby. [25]

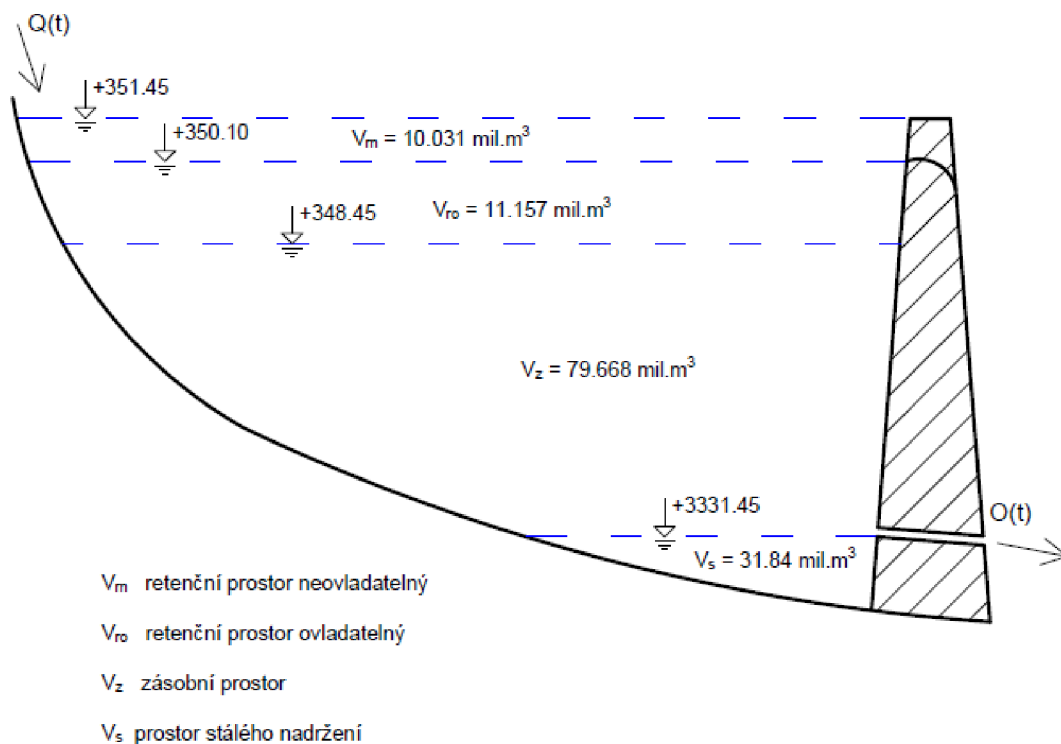
4.1.1 Technické parametry

Nádrž Vranov

Stálé nadržení	31,840 mil.m ³ .
Hladina stálého nadržení	331,45 m n. m.
Zásobní prostor	79,668 mil.m ³ .
Hladina zásobního prostoru	348,45 m n. m.
Prostor retenční ovladatelný	11,157 mil.m ³ .
Hladina retenčního prostoru ovladatelného	350,10 m n. m.
Prostor retenční neovladatelný	10,031 mil.m ³ .
Hladina retenčního prostoru neovladatelného	351,45 m n.m.
Celkový objem	132,696 mil.m ³ .

Hydrologické údaje

Číslo hydrologického pořadí	4-14-02-051.
Plocha povodí	2 221,80 km ² .
Průměrný dlouhodobý roční průtok	9,740 m ³ s ⁻¹ .
Q ₁₀₀	435,00 m ³ s ⁻¹ .
Q _{355d}	1,110 m ³ s ⁻¹ .



Obrázek 9. Vodohospodářské schéma nádrže Vranov – funkční prostory


4.2 Reálné průtokové řady

Reálná průtoková řada $Q_{m,real}$ byla sečtena z reálné průtokové řady toku Dyje a z reálné průtokové řady toku Želetavky. Data průtokových řad poskytl Český hydrometeorologický ústav. Data jsou pořízená z měrné stanice Podhradí pod Dyjí a měrné stanice Vysočany na toku Želetavka. Hydrologická řada průměrných měsíčních průtoků ze stanice Podhradí pod Dyjí obsahuje data za období 1935–2017. Řada ze stanice Vysočany obsahuje data za období od listopadu roku 1956 až do prosince roku 2017. Jelikož hydrologická řada ze stanice Vysočany obsahují pouze data od listopadu roku 1956, byla reálná řada měsíčních průtoků sestavena od roku 1957 až do roku 2017.

4.2.1 Hlásný profil stanice Podhradí nad Dyjí

Jak bylo již zmíněno v předchozím textu, data pocházejí ze stanice Podhradí nad Dyjí, který provozuje ČHMÚ Brno. Měrná stanice se nachází 200 m pod jezem v Podhradí u pravého břehu toku Dyje. Vyznačen je na mapě viz obrázek 8. Nula vodočtu je v nadmořské výšce 348,36 m n. m. a číslo hydrologické pořadí profilu 4-14-02-007. [26] Další důležité informace a hodnoty průtoků se nalézají v následujících tabulkách.

Tabulka 5. Evidenční list hlásného profilu č. 358 [26]

Evidenční list hlásného profilu č.358				Stanice kategorie : A					
				 					
Tok:	Dyje	Stanice:	Podhradí nad Dyjí						
Kraj:	Jihomoravský kraj	ORP:	Znojmo	Obec:	Podhradí nad Dyjí				
Provozovatel stanice:		ČHMÚ Brno		Předpovědní profil ČHMÚ PP*					
Centrum automatického sběru dat:		ČHMÚ Brno, VHD Povodí Moravy Brno							
Staničení:	190,09 [km]	Číslo hydrologického pořadí:	4-14-02-007						
Plocha povodí:	1755,49 [km ²]	Zeměpisné souřadnice:	15.6908163 v.d. 48.9033249 s.š.						
Nula vodočtu:	348,36 [m.n.m.]	Procento plochy povodí toku:	38,0						
Stupně povodňové aktivity:		[cm]	[m ³ .s ⁻¹]	Platnost SPA pro úsek toku:					
Bdělost	180	72,7	státní hranice - VD Vranov						
Pohotovost	230	116	Kritické místo:						
Ohrožení	280	166							
Průměrný roční stav:	70 [cm]	N-leté průtoky:	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀		
Průměrný roční průtok:	8,81 [m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	98	155	195	320	390		

Tabulka 6. M-denní průtoky měrné stanice Podhradí pod Dyjí [27]

M-denní průtoky	Q ₃₀	Q ₆₀	Q ₉₀	Q ₁₂₀	Q ₁₅₀	Q ₁₈₀	Q ₂₄₀	Q ₂₇₀	Q ₃₀₀	Q ₃₃₀	Q ₃₅₅	Q ₃₆₄
[m ³ .s ⁻¹]	20	12,9	8,9	6,8	5,5	4,7	4,0	2,7	2,2	1,6	0,9	0,4

4.2.2 Hlásný profil stanice Vysočany na toku Želetavka

Stejně jako měrnou stanicí Podhradí nad Dyjí i měrná stanice Vysočany na toku Želetavka je provozována ČHMÚ v Brně. Vyznačená je také na obrázku 8 a je umístěna pod areálem tábora na pravém břehu toku. Hydrologické číslo pořadí je 4-14-02-0248. Nula vodočtu se nachází v nadmořské výšce 361,61 m n. m. a plocha povodí má rozlohu 368,71 km². toku. [28] V následujících tabulkách jsou opět zobrazeny hodnoty N-letých a M-denních průtoků ze stanice Želetavky.

Tabulka 7. Evidenční list hlásného profilu č. 360 [28]

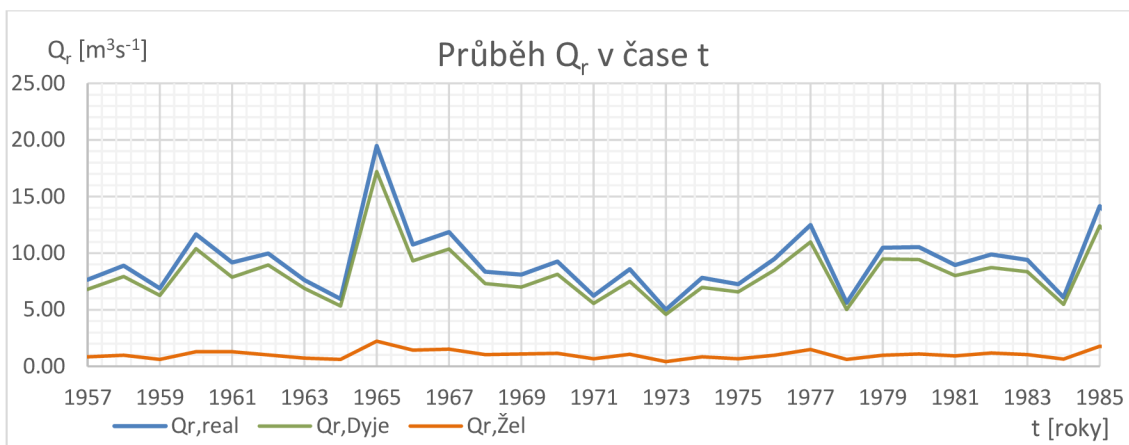
Evidenční list hlásného profilu č.360				Stanice kategorie : B			
Tok:	Želetavka	Stanice:	Vysočany				
Kraj:	Jihomoravský kraj	ORP:	Znojmo	Obec:	Vysočany		
Provozovatel stanice:				ČHMÚ Brno			
Centrum automatického sběru dat:				ČHMÚ Brno			
Staničení:	4.86 [km]	Číslo hydrologického pořadí:	4-14-02-048				
Plocha povodí:	368,71 [km ²]	Zeměpisné souřadnice:	15.6832629 v.d. 48.9595709 s.š.				
Nula vodočtu:	361,61 [m.n.m.]	Procento plochy povodí toku:	98,0				
Stupně povodňové aktivity:	[cm]	[m ³ .s ⁻¹]	Platnost SPA pro úsek toku:				
Bdělost	100	10,4	Police - ústí toku				
Pohotovost	150	25,8	Kritické místo:				
Ohrožení	180	36					
Průměrný roční stav:	34 [cm]	N-leté průtoky:	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Průměrný roční průtok:	1,21 [m ³ s ⁻¹]	[m ³ s ⁻¹]	10	27	37	64	78

Tabulka 8. M-denní průtoky měrné stanice Vysočany

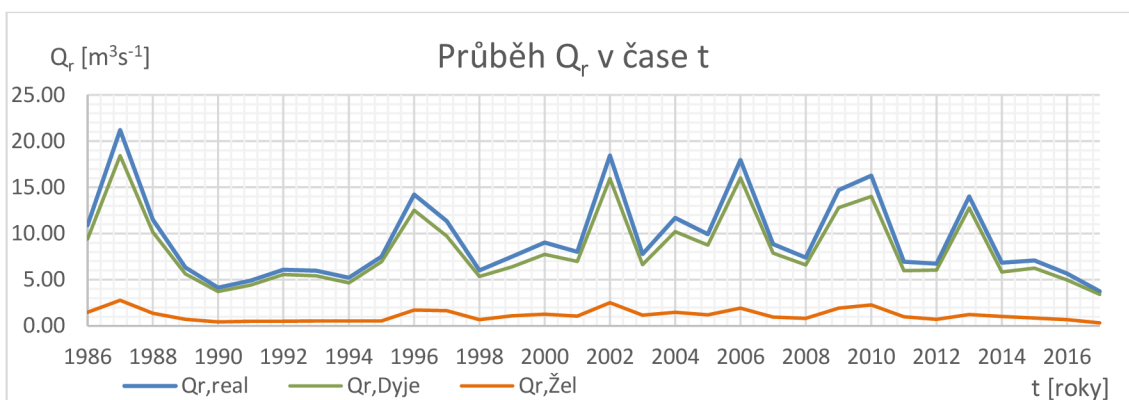
N-leté průtoky	Q ₃₀	Q ₆₀	Q ₁₂₀	Q ₁₈₀	Q ₂₄₀	Q ₃₆₄
[m ³ s ⁻¹]	0,77	0,45	0,26	0,17	0,07	0,02

Chronologický průběh průměrných průtoků celkové reálné průtokové řady, reálné průtokové řady Dyje a reálné průtokové řady Želetavky je popsán v následujících grafech. Měsíční průtoky byly převedeny na průměrné roční průtoky Q_r . Z grafu 1 a 2 pozorujeme, že velmi vodný rok byl 1965, 1987, 2002, 2006 a 2010, kdy průměrný průtok celkové reálné řady $Q_{r,real}$ dosahoval přes $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Naopak suché roky jsou zaznamenány v roce 1964, 1973, 1978, 1984 a dále dlouhé období sucha od roku 1990 až do roku 1994. V těchto letech se průměrný průtok $Q_{r,real}$ pohyboval okolo hodnoty $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Od roku 2000 pozorujeme střídavý průběh suchého a vodnatějšího období. Změna poté nastala v roce 2014, kdy jsou pozorovány velmi nízké průměrné průtoky.

Lineární spojnice trendu reálné průtokové řady je zobrazena v grafu 3. Můžeme vidět, že spojnice trendu má lehce rostoucí průběh. Křivka roste pravděpodobně díky vodnému období od roku 2002 do roku 2013. Tam pozorujeme výraznější průtoky a v České republice se objevovaly častější povodně. Naopak málo vodné období je zaznamenáno od roku 1967 do roku 1983. Pokud sucho, které přetrvává od roku 2013 bude pokračovat i v dalších letech. Dá se předpokládat, že křivka nabere opačný směr (klesající), což bude mít velmi špatné dopady na celkový nedostatek vody.



Graf 1. Průběh průměrných průtoků reálných průtokových řad v čase t od roku 1957 do roku 1985



Graf 2. Průběh průměrných průtoků reálných průtokových řad v čase t od roku 1986 do roku 2017



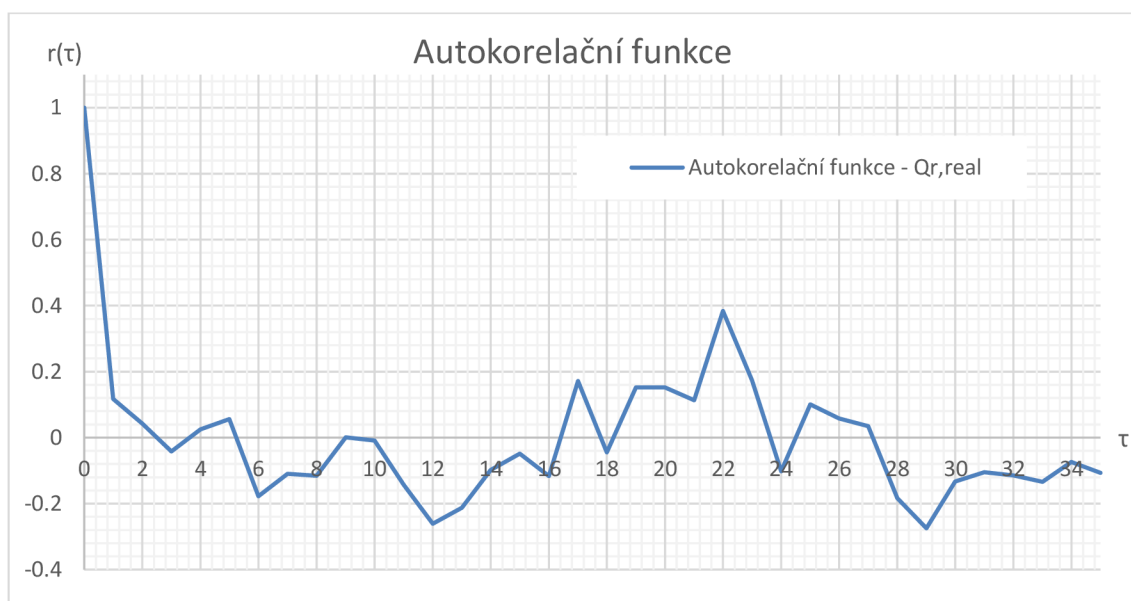
Graf 3. Průběh lineární spojnice trendu průměrných ročních průtoků reálné průtokové řady

4.3 Analýza časových hydrologických řad průměrných ročních průtoků

První část diplomové práce se bude zabývat analýzou hydrologických řad. Pro analýzu byla použita reálná průtoková řada Želetavky $Q_{m,\text{Žel}}$, reálná průtoková řada Dyje $Q_{m,\text{Dyje}}$ a celková reálná průtoková řada měsíčních průtoků $Q_{m,\text{real}}$. V následujících podkapitolách budou zobrazeny průběhy autokorelačních funkcí jednotlivých řad. Dále spektrální hustoty i trendové složky a bude zde popsáno chování časových řad. Celá analýza pracuje s ročními průměrnými průtoky Q_r .

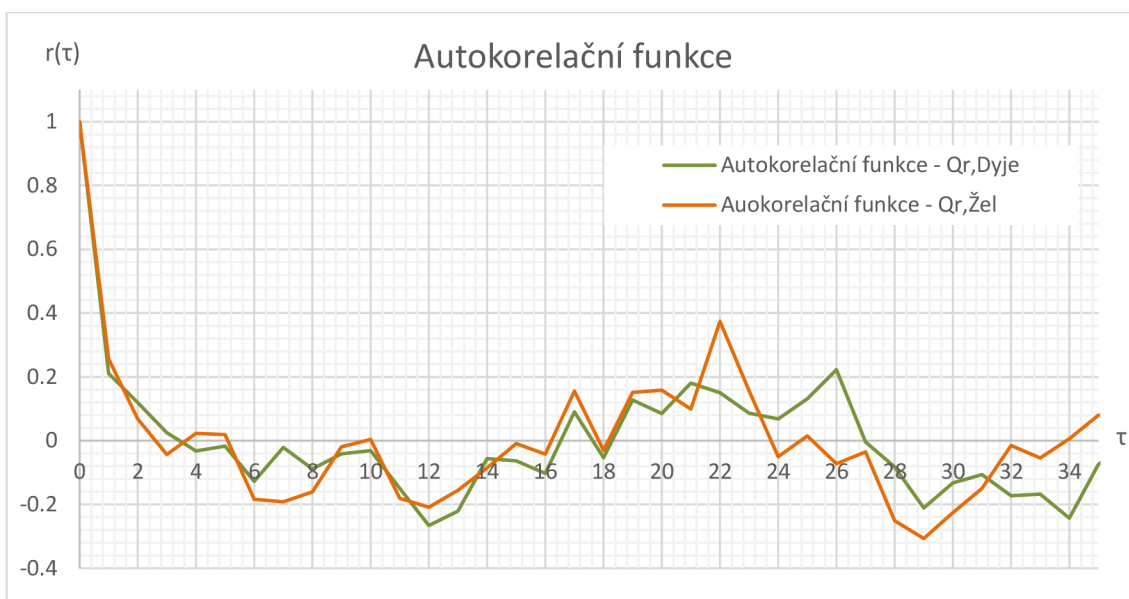
4.3.1 Autokorelační funkce

V grafu 4 je znázorněn průběh autokorelačních funkcí jednotlivých časových řad. Autokorelační funkce byla vypočtena dle kapitoly 3.1.3 ze vztahu (3). Na průběhu funkce autokorelace reálné průtokové řady $Q_{r,\text{real}}$ je vidět několik lokálních extrémů. Největší lokální extrém byl dosažen pro $\tau = 22$ hodnoty 0,4. Méně znatelný extrém pozorujeme pro $\tau = 17$, kdy se hodnota autokorelace pohybuje těsně pod 0,2. V dané funkci se vyskytují i dva záporné lokální extrémy a to pro $\tau = 12$ a $\tau = 29$.



Graf 4. Autokorelační funkce reálné průtokové řady $Q_{r,\text{real}}$

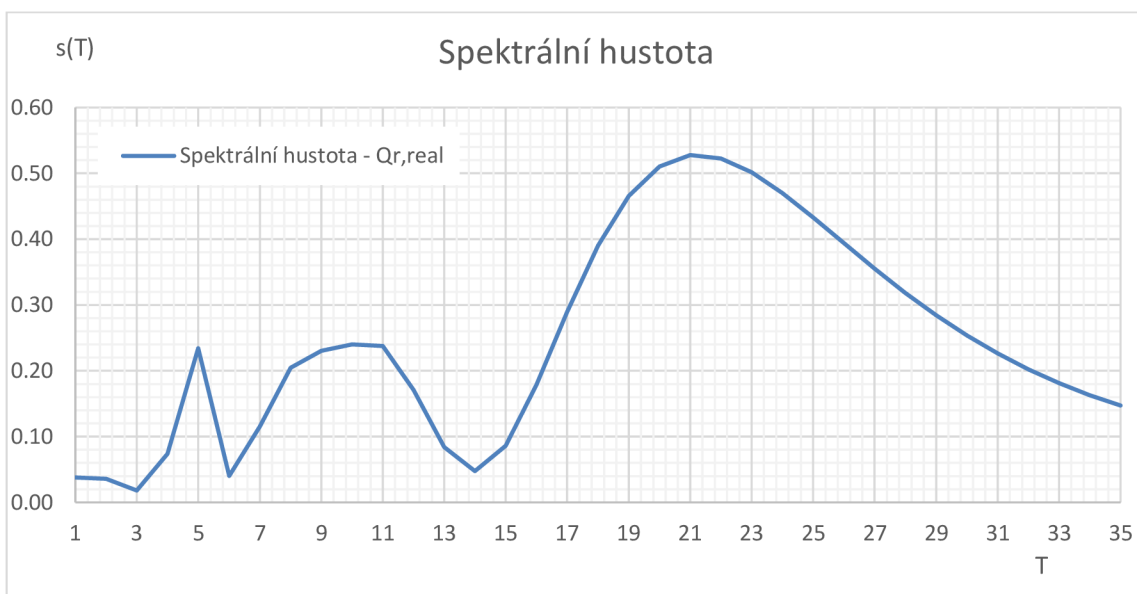
Celkem podobný průběh můžeme hodnotit u reálné průtokové řady Dyje a Želetavky z grafu 5. Lokálního extrému 0,4 dosáhla reálná průtoková řada Želetavky, a to pro $\tau = 22$ stejně jako u reálné průtokové řady. U reálné průtokové řady Dyje se hodnota extrému vyšplhala po 26 letech na hodnotu pohybující se okolo 0,22.



Graf 5. Autokorelační funkce reálných průtokových řad Dyje a Želetavky

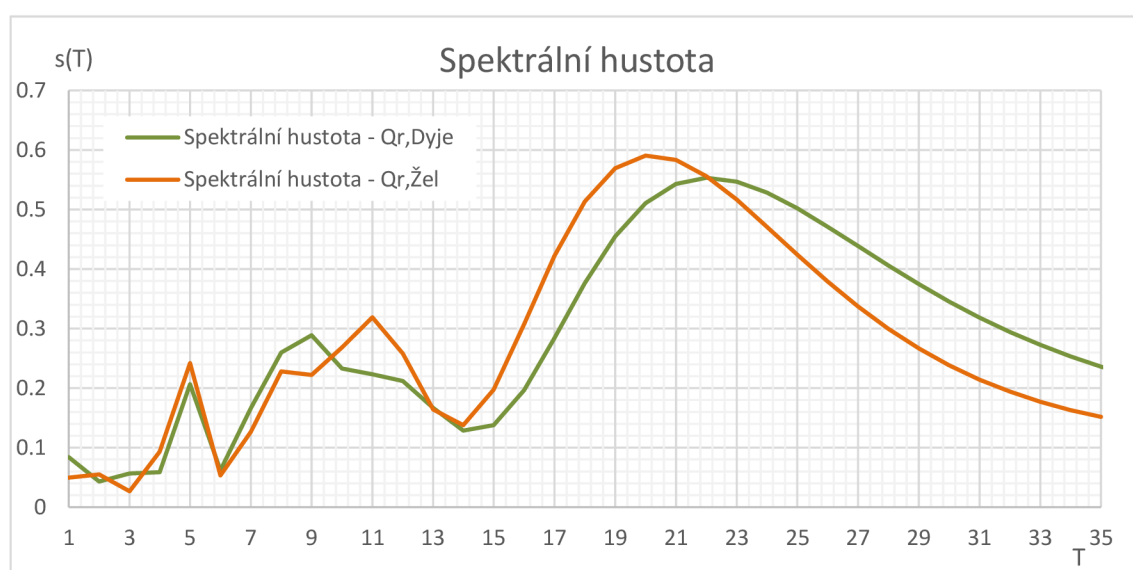
4.3.2 Spektrální hustota

Spektrální hustota byla vypočtena Fourierovou transformací autokorelační funkce. Vypočtené hodnoty spektrální hustoty jsou sestaveny v následujícím grafu 6. Opět jsou zde popsány všechny tři zkoumané reálné průtokové řady. Průběhy všech spektrálních hustot mají velice podobný průběh. U celkové reálné průtokové řady $Q_{r,real}$ dosahuje řada absolutního maxima pro $T = 21$, která odpovídá délkám period vyskytujících se v reálné řadě. Dalších extrémů dosáhla maxima v bodě $T = 5$ a $T = 11$.



Graf 6. Spektrální hustoty reálné průtokové řady $Q_{r,real}$

Reálná řada Dyje a Želetavky mají opět podobný průběh. Ovšem globálního extrému se u jednotlivých řad liší. Reálná průtoková řada Dyje dosahuje absolutního maxima pro hodnotu $T = 22$. V reálné průtokové řadě Dyje jsou zaznamenány nejvyšší hodnoty průtoku v roce 1965 a v roce 1987, což odpovídá periodě 22 let. Patrné jsou také extrémy v bodě $T = 5$ a $T = 9$. Reálná průtoková řada Želetavky maxima dosáhla v bodě $T = 20$. Druhý nejvyšší lokální extrém je zaznamenán pro $T = 11$ a stejně jako u celkové reálné průtokové řady a reálné řady Dyje dosahuje i reálná průtoková řada Želetavky lokálního maxima v $T = 5$.

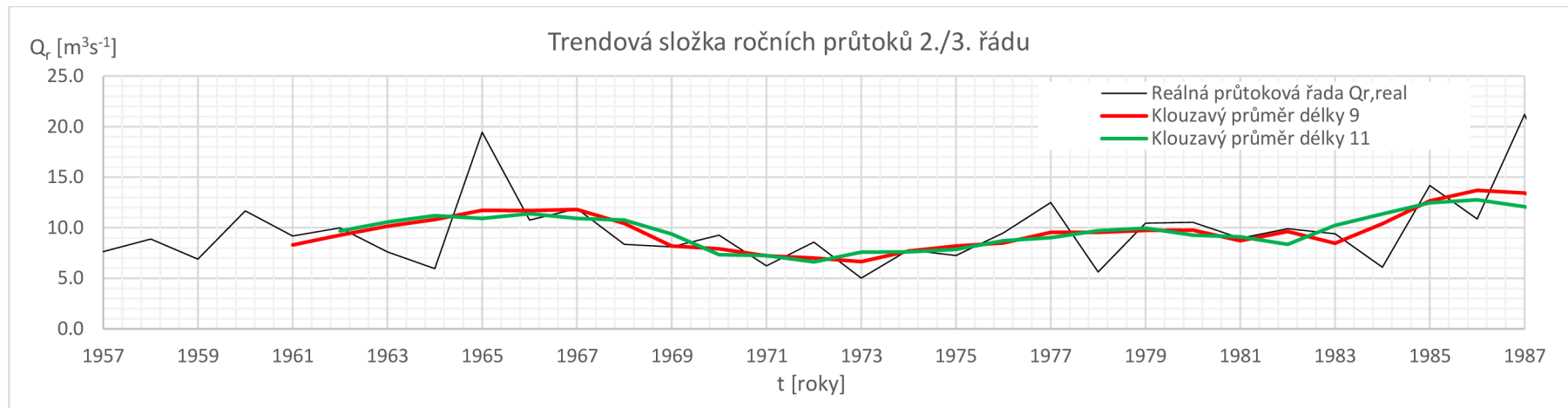


Graf 7. Spektrální hustoty reálných průtokových řad Dyje a Želetavky

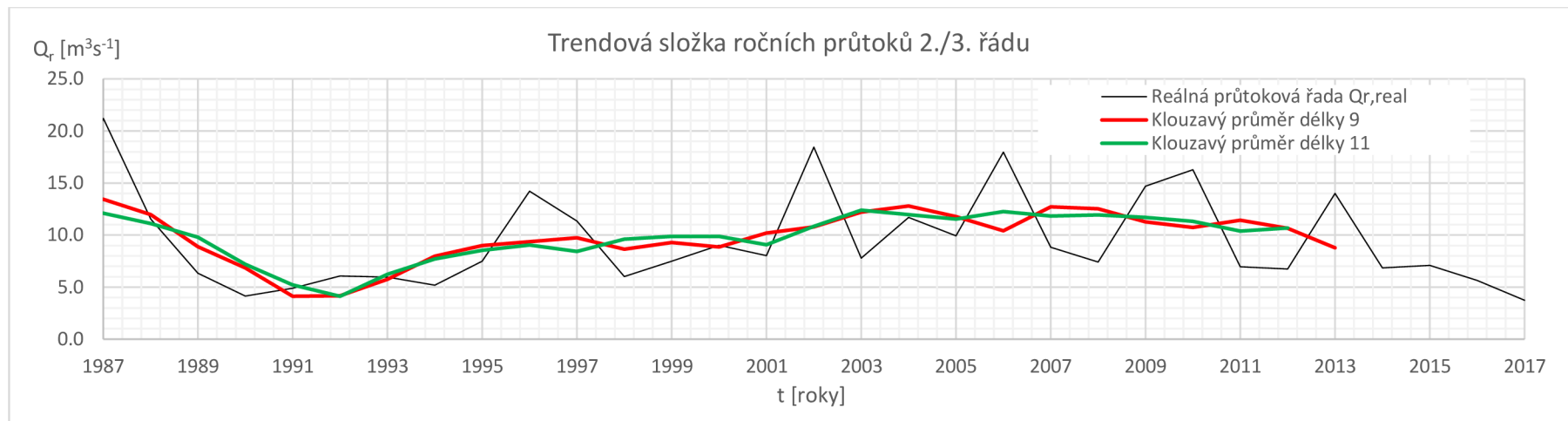
4.3.3 Trendová složka celkové reálné průtokové řady $Q_{r,real}$

Pro stanovení trendové složky byla využita metoda klouzavých průměrů dle tabulky 1. Nejprve bude rozebrána celková reálná průtoková řada $Q_{r,real}$. Z grafu 6, kde je popsán průběh spektrální hustoty průtokové řady je viditelné, že nejsilnější délka skrytých period je pro $T = 11$ a zároveň $T = 21$ let. Jelikož sudé délky jsou nevýhodné, byly k podrobnějšímu zkoumání vybrány klouzavé průměry délky 9 a 11. Klouzavý průměr délky 11 dosahuje ve spektrální hustotě vyšší hodnoty, a proto byl vybrán jako reprezentativní.

Průběh trendových složek je detailně znázorněn v následujících dvou grafech 8, 9 a lze z něho vyčíst lokální extrémy. Významné maximální extrémy jsou nalezeny v letech 1967, 1978, 1997, 2003 a 2005. Naopak lokální minima se vyskytla v letech 1972, 1992, 1997.

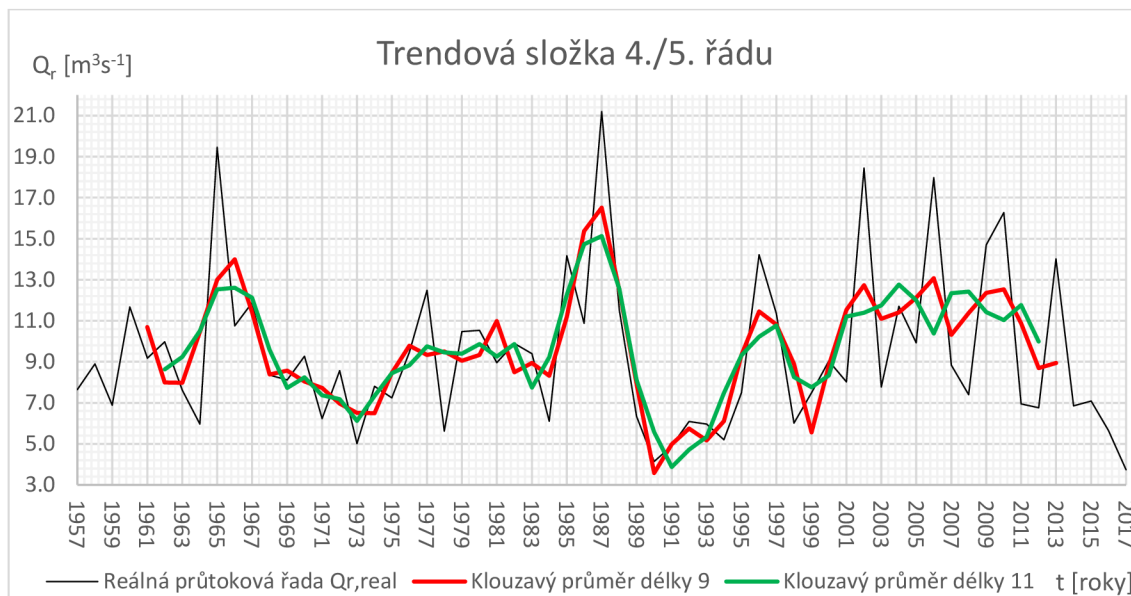


Graf 8. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1957–1987



Graf 9. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1987–2017

Následující graf 10 slouží k porovnání lokálních extrémů trendových složek 4./5. řádu s grafem 8 a 9, kde jsou vyobrazeny trendové složky 2./3. řádu. Jako reprezentativní byl opět vybrán řád 11 z důvodu vyšší hodnoty ve spektrální hustotě. Významné lokální maxima trendu se nacházejí v letech 1965, 1987, 1997, 2004, 2008. Lokální minima trendu naopak v letech 1973, 1983, 1991, 1999 a 2006.



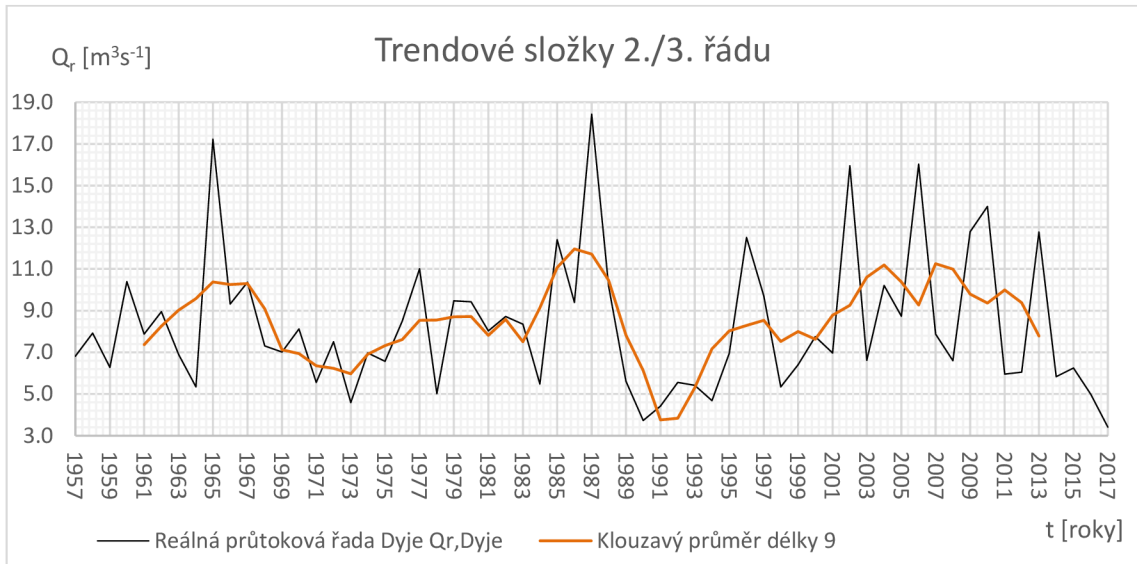
Graf 10. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a vyhlazené řady 4./5. řádu

U trendové složky 4./5. řádu se lokální extrémů přibližují extrémům průměrných ročních průtoků z reálné řady. Dva nejvyšší extrémů průtoků jsou zaznamenány v roce 1965 a 1987. Lokální maximum trendu je znázorněno také v roce 1965 a 1987. Naopak dvě nejvýznamnější minima průtoků nastala v roce 1973 a 1990. Minimální lokální extrém trendu vyšel také v roce 1973 a druhý v roce 1991.

4.3.4 Trendová složka reálné průtokové řady Dyje $Q_{r,Dyje}$ a Želetavky $Q_{r,Žel}$

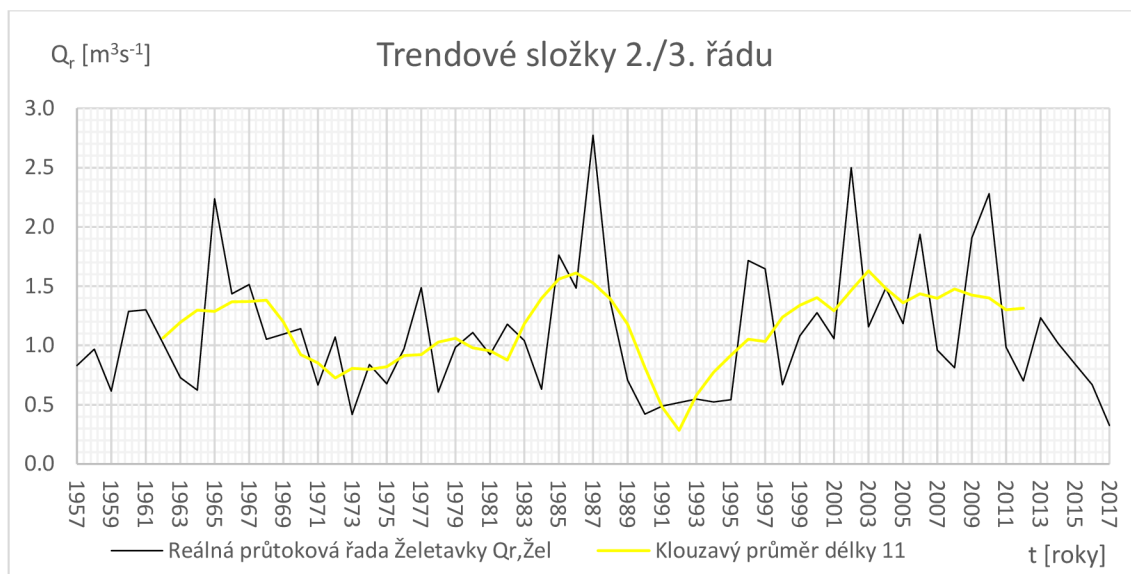
Zobrazený průběh trendu složky 2./3. řádu v graf 11 je znázorněn pro reálnou průtokovou řadu Dyje $Q_{r,Dyje}$. Ve spektrální hustotě vyšla maximální délka skryté periody 22. V literatuře však není popsán výpočet klouzavého průměru pro takto vysokou hodnotu periody. Proto byla zvolena délka klouzavého průměru 9, což je druhá nejvyšší hodnota skryté periody ve spektrální hustotě.

V grafu 11 je znázorněn průběh lokálních extrémů. Maxima pro klouzavý průměr délky 9 dosahuje v roce 1965, 1986, 2004, 2007. Významná minima jsou pozorována v roce 1973, 1983, 1991, 2000, 2006.



Graf 11. Porovnání průběhu $Q_{r,Dyje}$ a vyhlazené řady 2./3. řádu

Následující graf 12 se zabývá porovnáním průběhu reálné průtokové řady Želetavka $Q_{r,žel}$ a vyhlazené řady 2./3. řádu. Délka skryté periody ve spektrální hustotě u průtokové řady Želetavky vyšla $T = 20$. Opět v literatuře není popsán výpočet takto vysoké hodnoty skryté periody pro klouzavý průměr. Byla tedy zvolena druhá nejvyšší hodnota skryté periody hodnoty $T = 11$. Proto výsledným reprezentativním klouzavým průměrem pro popis řady je klouzavý průměr délky 11. Lze vidět výskyt lokálního maxima v letech 1967, 1986 a 2003, perioda se přibližuje k $T = 20$ ve spektrální hustotě. Lokální minimum pozorujeme v letech 1972, 1983 a 1992.



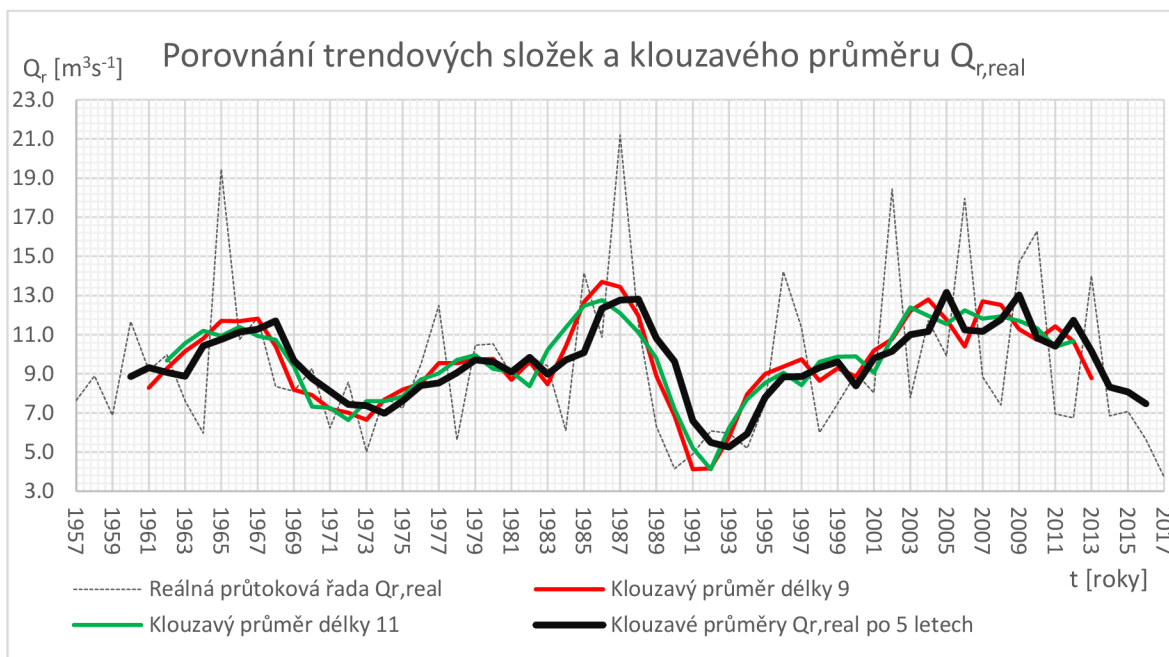
Graf 12. Porovnání průběhu $Q_{r,\text{Žel}}$ a vyhlazené řady 2./3. řádu

4.3.5 Klouzavý průměr

K vyhlazení celkové reálné průtokové řady byly vypočítány metodou klouzavých průměrů průměry délky pěti let. Je to jedním z nejběžnějších a nejvíce používaných ukazatelů časové řady. V graf 13 je znázorněno porovnání klouzavého průměru délky pěti let s trendovými složkami 2./3. řádu délky 9 a 11.

Mezi klouzavým průměrem a trendovými složkami není tolik patrný rozdíl. Dá se říct, že klouzavý průměr má podobný průběh jako trendové složky a zároveň vyhlazuje reálnou průtokovou řadu $Q_{r,\text{real}}$. Daný vývoj složek ukazuje relativně pravidelný průběh střídání a vyskytování lokálního maxima a minima. První maximum, které se v reálné řadě projevilo v roce 1965, tak u klouzavého průměru pozorujeme až v roce 1968. V dalších letech nastalo výrazně suché období. Klouzavý průměr i trendové složky spadly k hodnotě průměrného průtoku $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Následujících 10 let se křivka trendových složek a klouzavého průměru téměř kopírují a nejsou zde zaznamenány žádná výrazná maxima ani minima.

Jak již bylo výše uvedeno, v roce 1987 je zaznamenán nejvyšší extrém z celého měřeného období. Stejně tak trendové složky a klouzavý průměr dosáhl maximálních hodnot a to okolo $13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Po necelých pěti letech nastává hned další extrém. Měřeny jsou nejnižší průtoky za celých 61 let. Klouzavý průměr nedosáhl tak nízkých hodnot jako trendové složky. Od roku 1997 nastává čas, kdy se střídá suché a vodnaté období. Klouzavý průměr se lehce rozchází s trendovými složkami. To může být způsobeno právě průměrovaným obdobím pěti let.



Graf 13. Porovnání trendových složek s klouzavým průměrem po 5 letech $Q_{r,real}$

4.3.6 Simulace plnění a prázdnění nádrže průměrných ročních průtoků

Simulace zásobní funkce nádrže neboli plnění a prázdnění nádrže bylo provedeno manuálním způsobem dle vztahů z kapitoly 3.4.2. Výpočet však byl proveden i v programu UNCE RESERVOIR, kde bylo uvažováno s roční průměrnou hodnotou výparu z vodní hladiny $E_a = 750$ mm. Výpar byl odečten z grafu, jímž se důkladněji zabývá bakalářská práce. Nalepšený odtok O_p byl zvolen $4,98$ m^3s^{-1} , při kterém hodnota zásobního objemu dosahuje $V_z = 79\,702\,520$ m^3 .

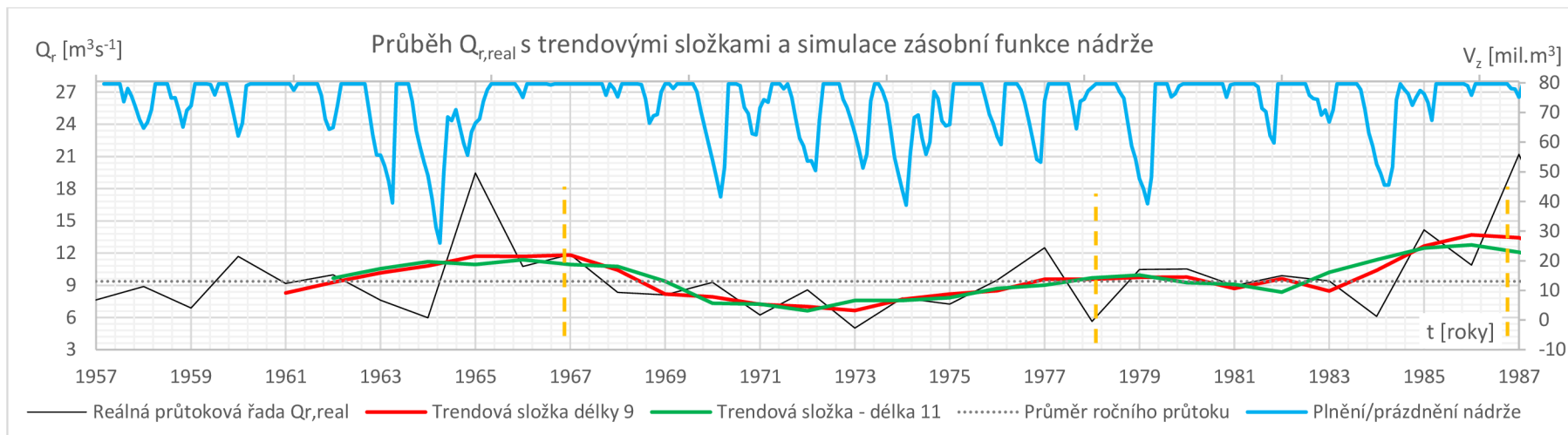
Průběh simulace je vykreslený v grafu 14 a 15, kde je zároveň znázorněný průběh reálné průtokové řady $Q_{r,real}$ a vyhlazení klouzavými průměry délky 9 a 11. V prvních přibližně šesti letech nepozorujeme v nádrži výrazné změny zásobního objemu. Ke změnám došlo v roce 1963 a 1964, kdy se objem nádrže vyprázdnil na přibližnou hodnotu $V_z = 20\,000\,000$ m^3 . Od následujícího roku po rok 1969 nastává vodné období a nádrž je téměř stále na maximální hodnotě zásobního objemu. Na dalších téměř 16 let nastává kolísavé období plnění a prázdnění nádrže. V tomto období dosahuje nejnižší hodnota zásobního objemu zhruba $35\,000\,000$ m^3 .

Dva nejvýraznější extrémů jsou pozorovány v dalších 10 letech. Nejvodnatější období z celého měřeného období začíná v roce 1985. Dokazuje to vychýlení reálné průtokové řady až k hodnotě průměrného ročního průtoku 22 m^3s^{-1} . Nádrž byla po dobu dalších

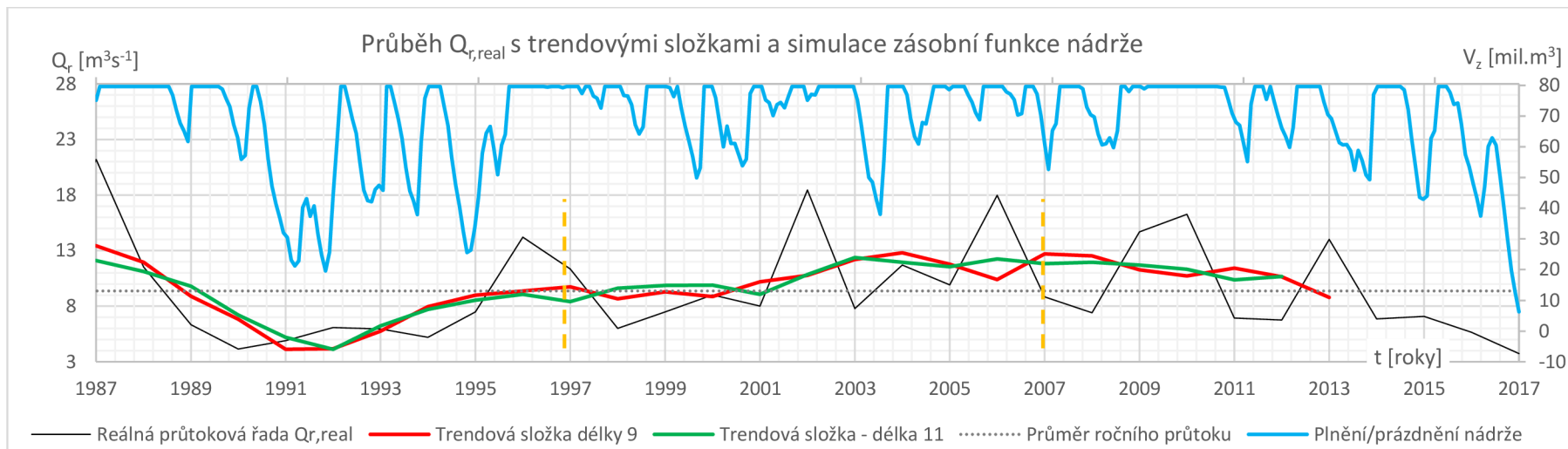
třech let téměř plná. Po tomto vodním období započal druhý extrém, a to období sucha na dalších 10 let. Hodnoty průměrného ročního průtoku spadly přibližně k $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nádrž se vyprázdnila na minimální hodnoty zásobního objemu. Toto období přetrvávalo až do roku 1995, kdy se nádrž naplnila a následovalo opět kolísavé období plnění a prázdnění nádrže.

Jak bylo již zmíněno, od roku 2014 Českou republiku zasáhlo znovu období sucha a průtoky klesly k minimálním hodnotám. Dokazuje to i nádrž Vranov, kde z grafu můžeme pozorovat úbytek zásobního objemu.

Simulaci plnění a prázdnění nádrže potvrzuje i průběh trendových složek, kterými je reálná průtoková řada vyhlazená. Do grafu byly vybrány délky klouzavých průměrů 9 a 11 z důvodu nejsilnější skryté periody $T = 11$ ve spektrální hustotě. Jejich průběh nabývá podobných extrémů jako průběh simulace. Skryté periody jsou v grafu vyznačeny čárkovanou čarou. Tím je ukázáno, že extrémy se projevují zhruba po 10 letech v průtokové řadě. Tomu zároveň odpovídají nejsilnější skryté periody okolo $T = 21$ let. Tento fakt vyplývá z výpočtu spektrální hustoty v kapitole 4.3.2, kde je patrný lokální extrém skrytých period 11 a 21 roků.



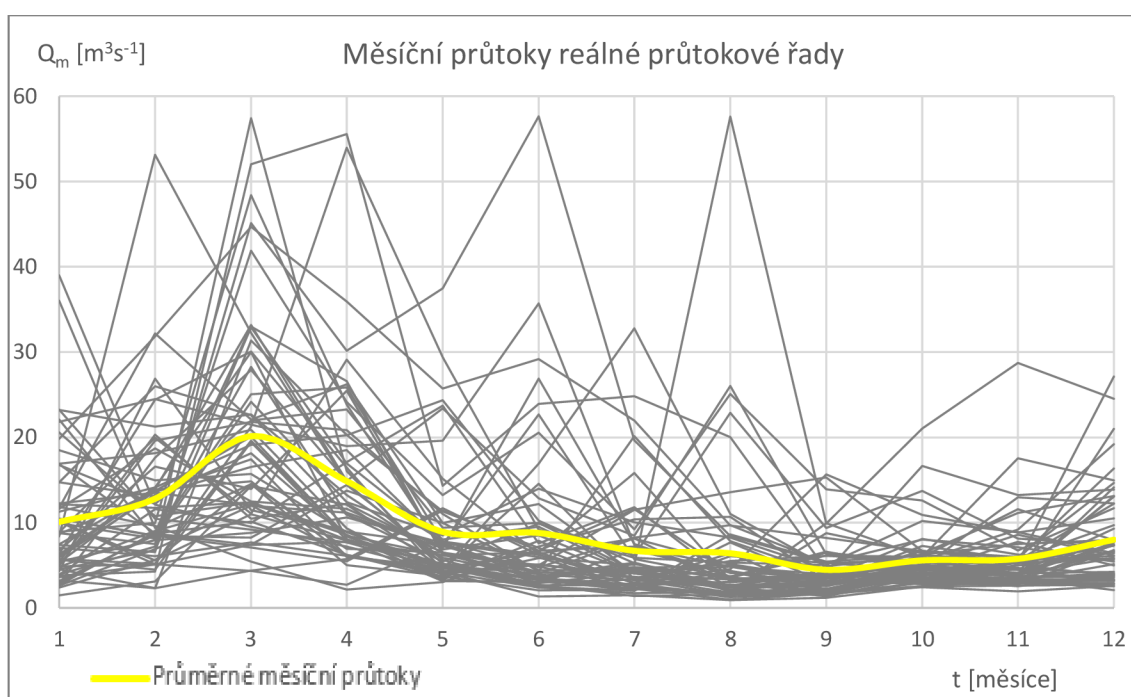
Graf 14. Průběh průměrných ročních průtoků $Q_{r,real}$ s trendovými složkami délky 9 a délky 11 a znázornění simulace zásobní funkce nádrže v letech 1957–1987



Graf 15. Průběh průměrných ročních průtoků $Q_{r,real}$ s trendovými složkami délky 9 a délky 11 a znázornění simulace zásobní funkce nádrže v letech 1987–2017

4.4 Analýza časových hydrologických řad průměrných měsíčních průtoků

V předchozích kapitolách byly rozebrány jednotlivé průtokové řady průměrných ročních průtoků. Následná kapitola se zabývá analyzováním měsíčních průtoků z reálné průtokové řady. Nejprve v následném grafu 16 jsou seskládané průběhy měsíčních průtoků, které jsou vloženy do jednoho grafu s vykresleným aritmetickým průměrem průtoků. Analýza se dále zabývá sestavením klouzavých průměrů a následného plnění a prázdnění nádrže Vranov.

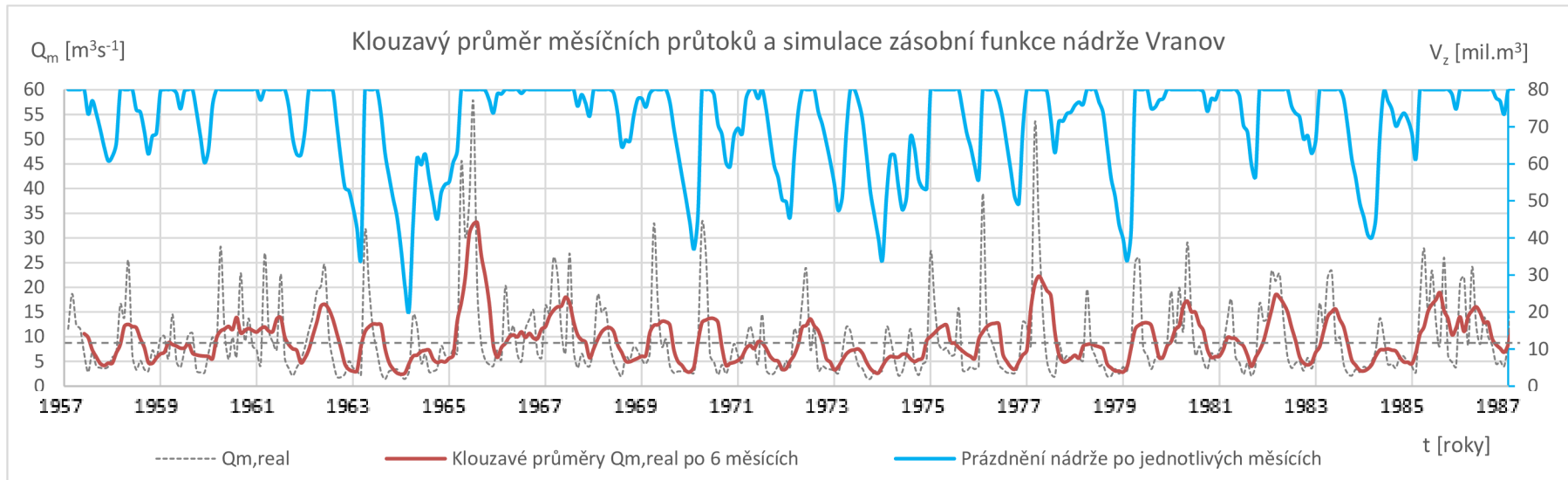


Graf 16. Měsíční průtoky reálné průtokové řady s vyznačeným aritmetickým průměrem

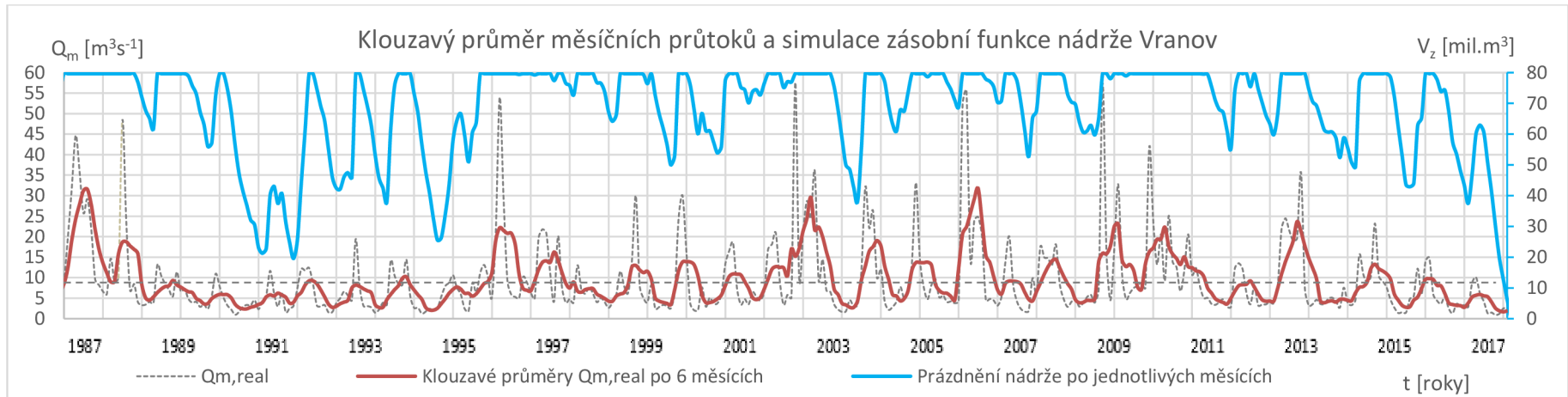
Po sestavení aritmetického průměru jednotlivých měsíčních průtoků je zřejmé, že nejvodnatějším měsícem za posledních 61 let je měsíc březen, a to s průměrným průtokem $20,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Důvodem bude tání sněhu z vyšších nadmořských výšek a zvýšený úhrn srážek v daném měsíci. Naopak nejméně vodným měsícem během roku je září, kdy průměrný průtok klesá k hodnotě $4,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Od dubna přes letní měsíce křivka pomalu klesá. Růst nastává až od podzimních měsíců, který trvá do března, kdy dosahuje maxima.

4.4.1 Simulace plnění a prázdnění nádrže průměrných měsíčních průtoků

Simulace plnění a prázdnění nádrže byla již v přechozí kapitole sestrojena pro reálnou průtokovou řadu ročních průtoků. Tato simulace je sestrojena pro stejný zásobní objem a nalepšený odtok. Plnění a prázdnění je tedy totožné s předchozí kapitolou, kde byla simulace provedena. Daná kapitola se zabývá vyobrazením simulace průměrných měsíčních průtoků reálné průtokové řady z důvodu důkladnějšího prozkoumání a analyzování časové řady. Proto je graf 17 a 18 rozdělen na dvě části. První část grafu zaujímá roky 1957–1987 a druhá znázorňuje průběh od roku 1987 po konec měřeného období, tedy roku 2017. Díky měsíčním průtokům není reálná řada tolik vyhlazená a je zde vidět podrobnější průběh průtoků v daném měřeném období. Pro zobrazení simulace byl sestrojen graf, jenž nám znázorňuje měsíční průtokovou reálnou řadu, klouzavé průměry v délce 6 měsíců a plnění/prázdnění nádrže Vranov.



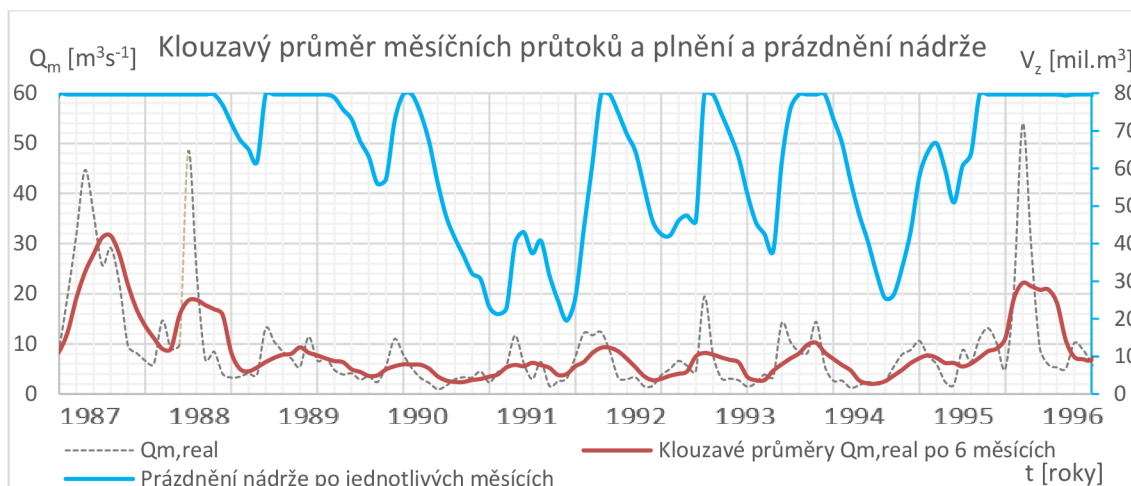
Graf 17. Klouzavé průměry měsíčních průtoků a znázornění simulace zásobní funkce nádrže Vranov v letech 1957–1987



Graf 18. Klouzavé průměry měsíčních průtoků a znázornění simulace zásobní funkce nádrže Vranov v letech 1987–2017

Skryté periody lokálních extrémů se zde vyskytují také po 10 a zároveň 21 letech. Byli již popsány u průměrných ročních průtoků a v této kapitole nebudou rozebírány. Klouzavý průměr vyhlazený po 6 měsících lépe popisuje průběh průtokové řady. Prvních pět let měřeného období nejsou žádné viditelné extrémy. Střídá se sušší a vodnatější období a průtok se pohybuje v rozmezí 5–15 m³s⁻¹. Sušší období a výrazné vyprázdnění nádrže, kdy zásobní objem spadl na hodnotu 20 000 000 m³, se projevil v letech 1963–1965. V nadcházejícím roce je zaznamenáno lokální maximum. Díky zvýšeným průtokům se nádrž naplnila na následujících pět let. Rokem 1970 začíná sušší období. Průtoky se pohybují spíše pod hranicí průměrného průtoků a důsledkem nižších průtoků je zaznamenáno větší prázdnění nádrže a menší hodnoty zásobního objemu. Konec suššího období je datováno od roku 1979, kdy spadnul zásobní objem na pouhých 33 000 000 m³. V daném období v roce 1977 nastal druhý lokální extrém, který na pár měsíců doplnil nádrž na hodnotu zásobního objemu okolo 68 000 000 m³.

Díky střídání suchých a vodných etap pozorujeme po předchozím málo vodném období opět stadium vodnosti dalších necelých 10 let. Zásobní objem se průměrně pohybuje na hodnotě 76 000 000 m³, což dokazuje převážné naplnění nádrže. Průtoky reálné průtokové řady a klouzavý průměr vykazují nadprůměrné hodnoty. Rokem 1989 nastalo opět střídání z vodnosti na suchou etapu, která trvala do roku 1995. Dané roky prokazují nejsušší etapu z celého měřeného období. Měsíční průtoky nedosahovaly téměř ani k průměrné hodnotě průtoků za celé měřené období. Průměrně se průtoky pohybovaly okolo 5 m³s⁻¹ a nejnižší zásobní objem se dotýkal 20 000 000 m³. Zásobní objem měl průměrnou hodnotu okolo 59 000 000 m³, což je o 20 milionů m³ méně než plný stav v nádrži. Jelikož je toto období nejsušší a došlo k nejvýraznějšímu poklesu zásobního objemu, je zde sestrojen v grafu 19 detail, ve kterém je lépe viděn průběh suchého období. Zároveň v detailu je dobře pozorováno, jak spolu koresponduje průtoková řada a průběh křivky znázorňující plnění/prázdnění nádrže.



Graf 19. Detail klouzavého průměru a plnění/prázdnění nádrže pro nejušší měřené období

Suché období vystřídala vodnost, která započala v roce 1996 dalším lokálním maximem. To způsobilo naplnění nádrže do maximálního zásobního objemu. Následoval průběh plnění a prázdnění nádrže bez výrazných výkyvů. V roce 2002 zaznamenáváme další výskyt extrémního průtoku až $57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Tím byla nádrž přivedena opět do plného stavu. Následný rok v reálné průtokové řadě vykazuje nízké hodnoty měsíčních průtoků, které vedou k většímu vyprázdnění nádrže na zásobní objem 38 milionů m^3 . Od následujícího roku nastává desetiletí vodnosti. Vyskytují se zde další dvě maxima průtoků pohybujících se přes $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a tyto hodnoty jsou zřetelně nadprůměrné. Nádrž má průměrnou hodnotu zásobního objemu 75 000 000 m^3 . Při posledních zaznamenaných extrémních průtocích se nádrž naplnila téměř na dobu dvou let.

V roce 2011 se situace opět otočila a z vodnosti nastává suchá epizoda. Jak již bylo řečeno, v současnosti se potýkáme s extrémním suchem, které přetrvává do současnosti. Sucho se projevilo i v nádrži Vranov, kdy se měsíční průtoky postupně dostaly pod hodnotu průměrného průtoku. Průměrně se pohybují okolo $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a hladina v nádrži postupně ubývá stejně jako zásobní objem. Můžeme říct, že simulace plnění a prázdnění nádrže Vranov kopíruje průběh měsíčních průtoků reálné průtokové řady.

4.5 Statistická analýza reálné průtokové řady

V přechodných kapitolách byla zpracována analýza průtokových řad z hydrologického hlediska, která bude pokračovat i v této kapitole a budou se zde rozebírat statistické charakteristiky. Jako vstupní data byla použita reálná průtoková řada $Q_{m,real}$, která je podrobně rozebrána v kapitole 4.2.

Popisujícími charakteristikami průtokových řad jsou v dané situaci statistické charakteristiky. Popsána byla reálná průtoková řada i umělé průtokové řady vygenerované z jednotlivých generátorů. Do základního souboru popisu byla užita střední hodnota, disperse, směrodatná odchylka, koeficient variace, koeficient asymetrie a koeficient špičatosti. Sestrojeny byly také empirické čáry pravděpodobnosti. Všechny statistické charakteristiky byly vypočteny dle vztahů uvedených v kapitole 3.3.

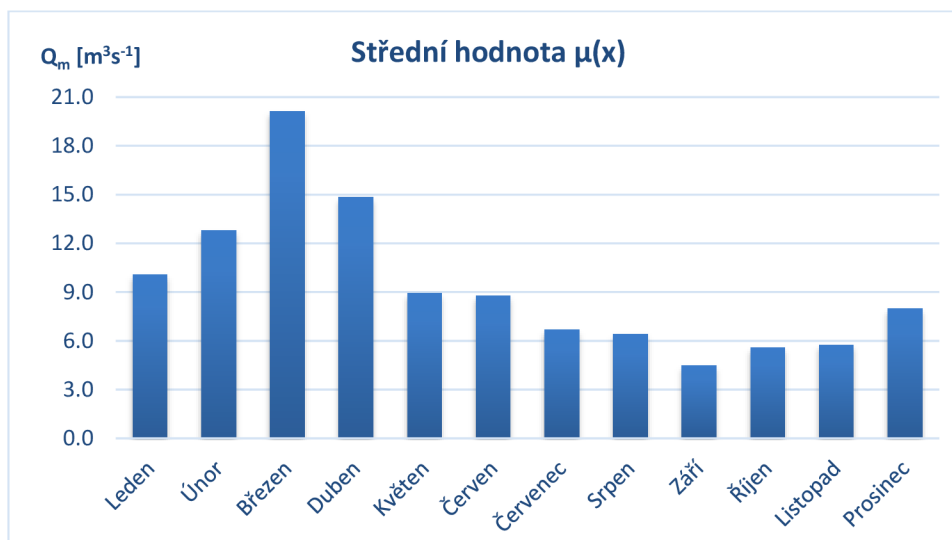
4.5.1 Statistické charakteristiky reálné průtokové řady

Podrobně jsou rozebrány statistické charakteristiky reálné průtokové řady pro detailnější vyhodnocení s umělými průtokovými řadami. V tabulce 9 jsou vypočteny dané jednotlivé charakteristiky, které jsou jednotlivě popsány a vyobrazeny v grafech.

Tabulka 9. Statistické charakteristiky reálné průtokové řady

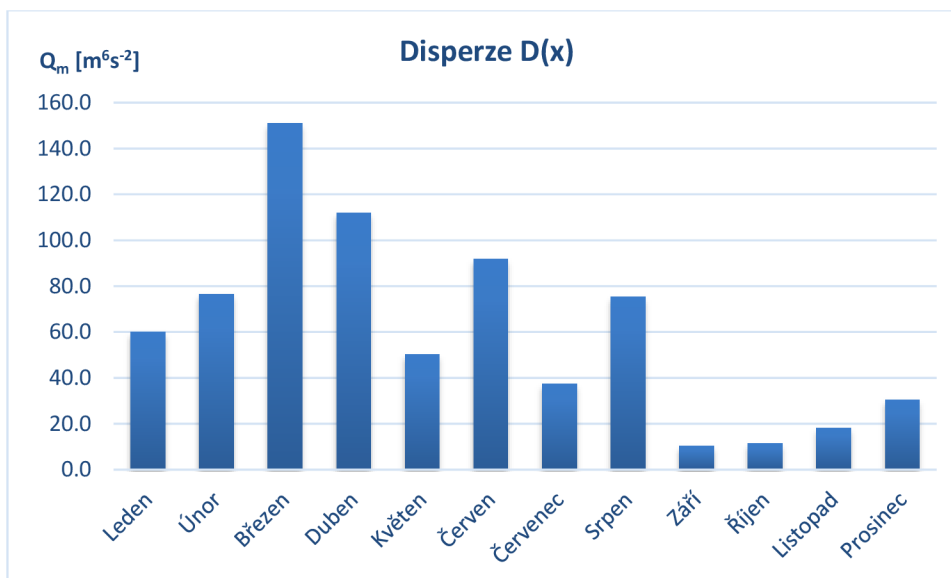
Měsíc	Statistické charakteristiky REAL					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ .s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	10,078	60,019	7,683	0,762	1,752	3,622
Únor	12,803	76,428	8,670	0,677	2,089	6,660
Březen	20,121	150,925	12,184	0,606	1,176	1,014
Duben	14,851	111,924	10,492	0,706	1,988	5,079
Květen	8,921	50,319	7,035	0,789	2,202	4,828
Červen	8,783	91,705	9,497	1,081	3,027	11,401
Červenec	6,696	37,507	6,074	0,907	2,348	6,052
Srpen	6,395	75,459	8,615	1,347	4,039	20,373
Září	4,466	10,268	3,178	0,712	1,971	4,062
Říjen	5,566	11,352	3,342	0,600	2,670	8,454
Listopad	5,754	18,141	4,224	0,734	3,251	14,092
Prosinec	7,991	30,498	5,477	0,685	1,541	2,374

V grafu 20 můžeme od začátku roku pozorovat nárůst středních hodnot průtoků s maximem dosahujícím v měsíci březnu. V březnu průměrná hodnota průtoků dosáhla $20,121 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Od následujícího měsíce hodnoty klesají až do září, kdy dosáhly minimální střední hodnoty s průtokem $4,466 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nadcházejícím měsícem po konec roku hodnoty opět pozvolna narůstají.



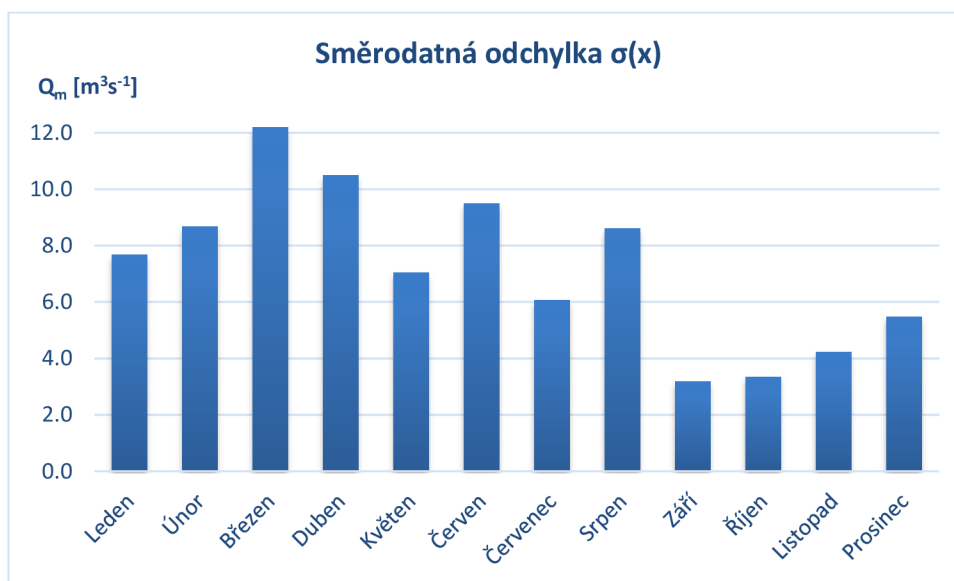
Graf 20. Střední hodnota měsíčních průtoků reálné průtokové řady

Disperze neboli rozptyl v grafu 21 nám udává rozptýlení hodnot průtoků od průměrné hodnoty. Maxima dosahuje měsíc březen, což potvrzuje reálná průtoková řada. Rozptyl průtoků ve výchozím měsíci se pohybuje v intervalu $Q_m \in (4,35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}; 57,42 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$. Vyšších hodnot disperze dosáhly i duben, červen a srpen. Naopak minima dosáhl zářijový měsíc, kde se rozptyl průtoků pohyboval v měřeném období reálné průtokové řady v intervalu od $1,2 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ do $15,65 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$. Další ustálené hodnoty průtoků jsou pozorovány v podzimních měsících a v prosinci.



Graf 21. Disperze měsíčních průtoků reálné průtokové řady

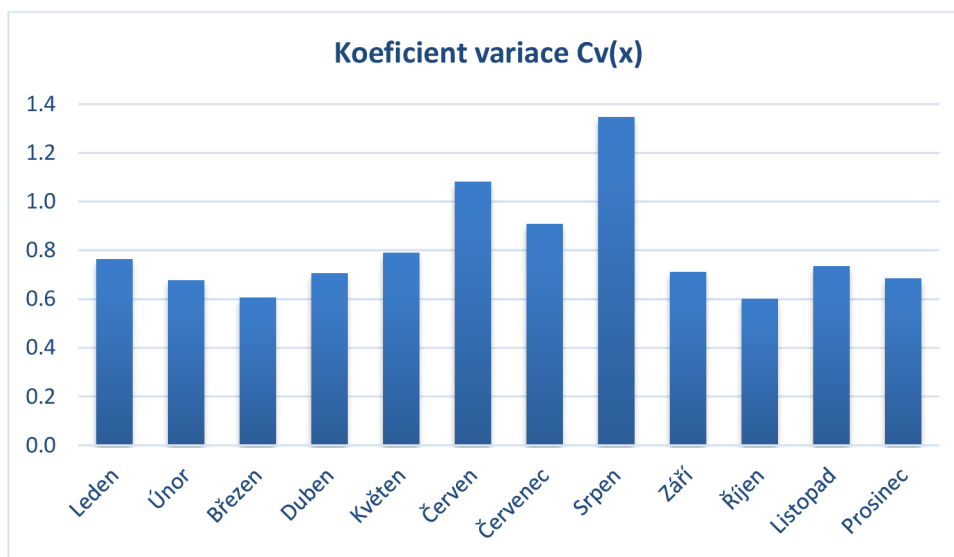
Směrodatná odchylka vychází z výpočtu disperze, proto v grafu 22 pozorujeme podobný průběh. Maxima jsou opět dosažena v březnu, dubnu, červnu a srpnu. Minima opět zaujímají měsíce září, říjen, listopad a prosinec.



Graf 22. Směrodatná odchylka měsíčních průtoků reálné průtokové řady

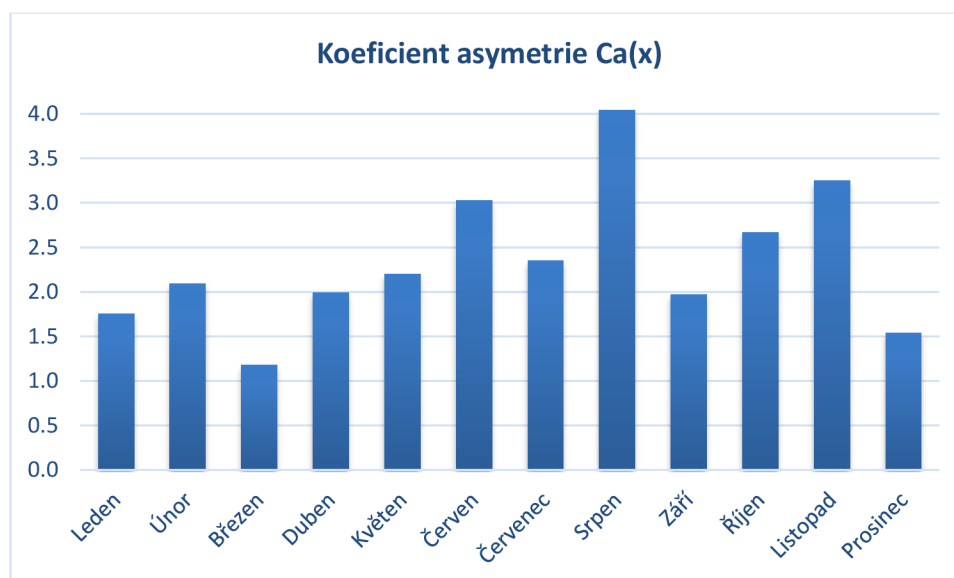
Koeficient variace slouží k posouzení rozptýlenosti dat vzhledem k průměru. Největší rozptýlenost v grafu 23 udává měsíc srpen, kdy se hodnota variace vyšplhala na 1,347. Hodnoty měsíčních průtoků v měřeném období za měsíc srpen se pohybují v rozmezí od

0,91 m³s⁻¹ do 57,61 m³s⁻¹. Dalším převyšujícím měsícem je červen a ostatní měsíce se pohybují průměrně okolo hodnoty koeficientu variace 0,7.



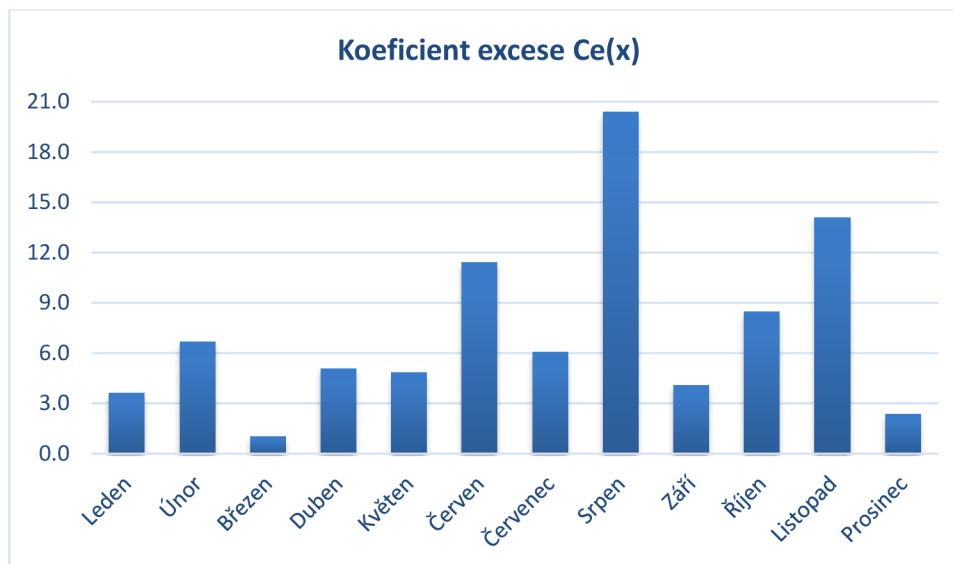
Graf 23. Koeficient variace měsíčních průtoků reálné průtokové řady

Ve všech měsících v reálné průtokové řadě nabývá koeficient asymetrie kladných hodnot. Šikmost je tedy levostranná – kladná. Maximum se prokázalo v grafu 24 opět v srpnovém měsíci a nabývá hodnoty 4,039. V březnu je zaznamenána hodnota koeficientu asymetrie 1,176 a jedná se o minimum.



Graf 24. Koeficient asymetrie měsíčních průtoků reálné průtokové řady

Koeficient excesu (špičatosti) znázorněn v grafu 25 je ve všech měsících také v kladných hodnotách. To značí, že většina hodnot veličin leží blízko její střední hodnoty a vliv na rozptyl mají málo odlehlé hodnoty. Srpen opět výrazně převyšuje ostatní měsíce a sahá k hodnotě 20,4. Minimum bylo znovu zaznamenáno v březnu s hodnotou 1,014.



Graf 25. Koeficient excesu měsíčních průtoků reálné průtokové řady

4.6 Statistické charakteristiky umělých průtokových řad

Pro diplomovou práci byly vygenerovány umělé průtokové řady z pěti různých generátorů. Pomocí vykreslení čar pravděpodobnosti překročení a výpočtu statistických charakteristik se vyhodnotí úspěšnost daných generátorů.

Podkladem pro generování umělých průtokových řad slouží reálná průtoková řada měsíčních průměrů $Q_{m,real}$ o délce 61 let. Umělé řady byly vygenerovány v generátorech průtokových řad:

- LNAR ($Q_{m,um,LNAR}$),
- LNMA ($Q_{m,um,LNMA}$),
- LRM ($Q_{m,um,LRM}$),
- LTAR ($Q_{m,um,LTAR}$),
- LTMA ($Q_{m,um,LTMA}$).

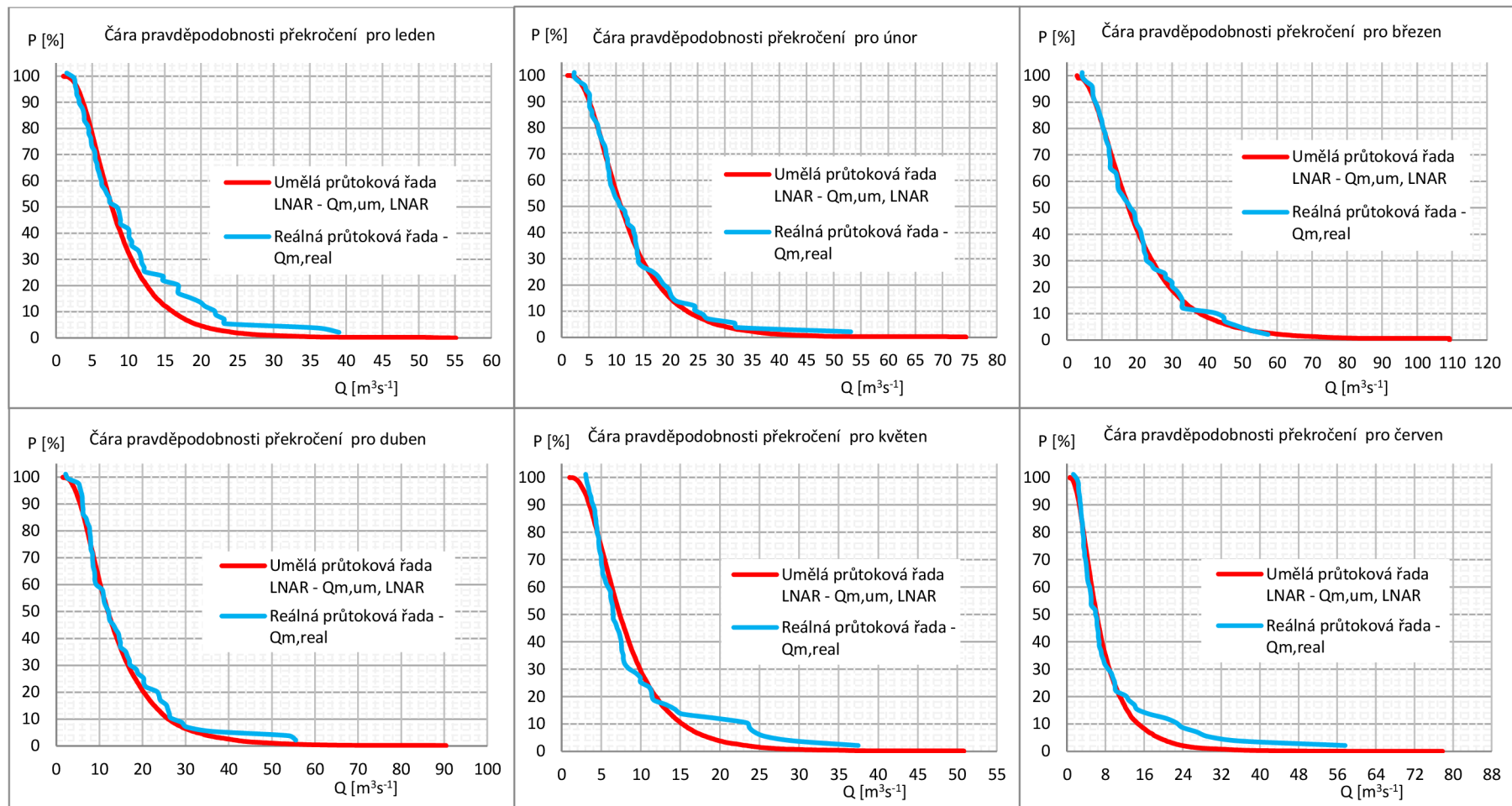
Umělé průtokové řady byly vygenerovány o délce 10 000 let. Pro reálnou řadu i pro umělé průtokové řady se vyhodnotily statistické charakteristiky a díky dostatečně

dlouhé řadě pozorovaných průtoků byly zkonstruovány empirické čáry překročení. Výpočet byl proveden dle vztahu Čegodajeva, jehož výpočet je rozebrán v bakalářské práci [20]. Celý tento postup byl zhotoven pro jednotlivé umělé řady a porovnán s reálnou průtokovou řadou. Na základě proložení čar pravděpodobnosti překročení charakterizující shodu umělé průtokové řady a reálné průtokové řady, také porovnání statistických charakteristik byl vybrán nejpřesnější generátor. Výsledky jsou reprezentovány v následujících tabulkách a grafech.

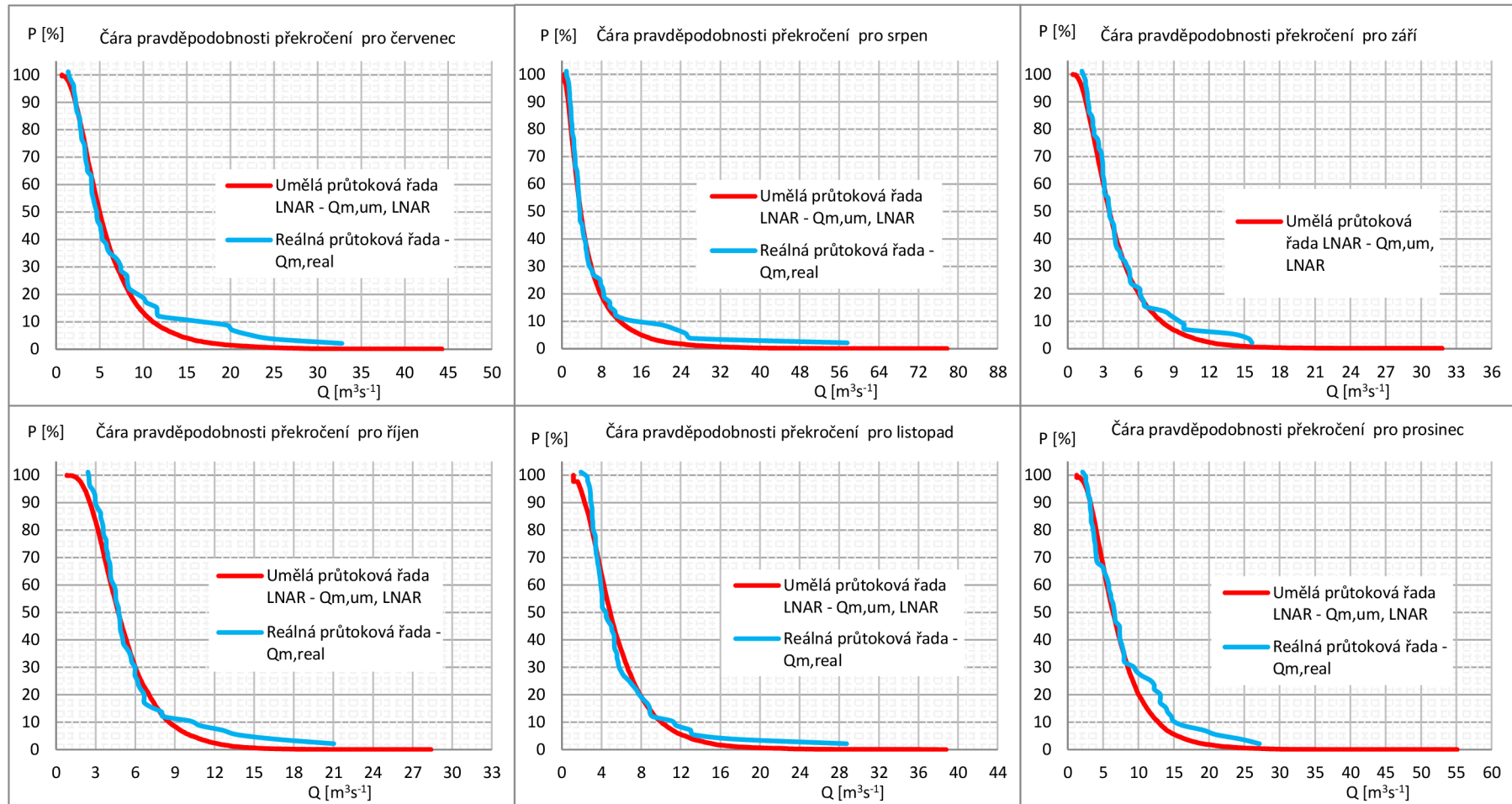
Jako první byly vyhodnoceny statistické charakteristiky pro umělou průtokovou řadu z generátoru LNAR. Po důkladném prozkoumání statistických charakteristik můžeme říci, že střední hodnoty mají podobný průběh jako reálná průtoková řada. Disperze vyšla ze všech umělých řad nejbližší reálné průtokové řadě právě z generátoru LNAR. Stejně tak i koeficient asymetrie se nejvíce podobá reálné průtokové řadě. Procentuálně od reálné průtokové řady se statistické charakteristiky liší o 11,5 %. Čáry překročení jsou podobné s reálnou průtokovou řadou v měsíci únor, březen, duben, srpen, září, říjen a listopad. V ostatních měsících se lehce rozcházejí.

Tabulka 10. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LNAR

Měsíc	Statistické charakteristiky LNAR					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ .s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	9,093	32,769	5,724	0,630	2,270	9,661
Únor	12,897	68,754	8,291	0,643	2,233	9,225
Březen	21,251	212,462	14,575	0,686	2,349	8,957
Duben	14,501	96,898	9,843	0,679	2,393	10,388
Květen	8,639	29,276	5,410	0,626	2,209	9,250
Červen	7,751	35,826	5,985	0,772	2,823	16,173
Červenec	6,109	18,602	4,313	0,706	2,487	11,379
Srpen	5,529	33,392	5,778	1,045	3,702	24,829
Září	4,297	9,094	3,015	0,702	2,626	14,089
Říjen	5,251	6,769	2,602	0,495	1,544	4,493
Listopad	5,723	12,440	3,527	0,616	2,101	8,682
Prosinec	7,393	18,473	4,298	0,581	1,903	7,186



Graf 26. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen

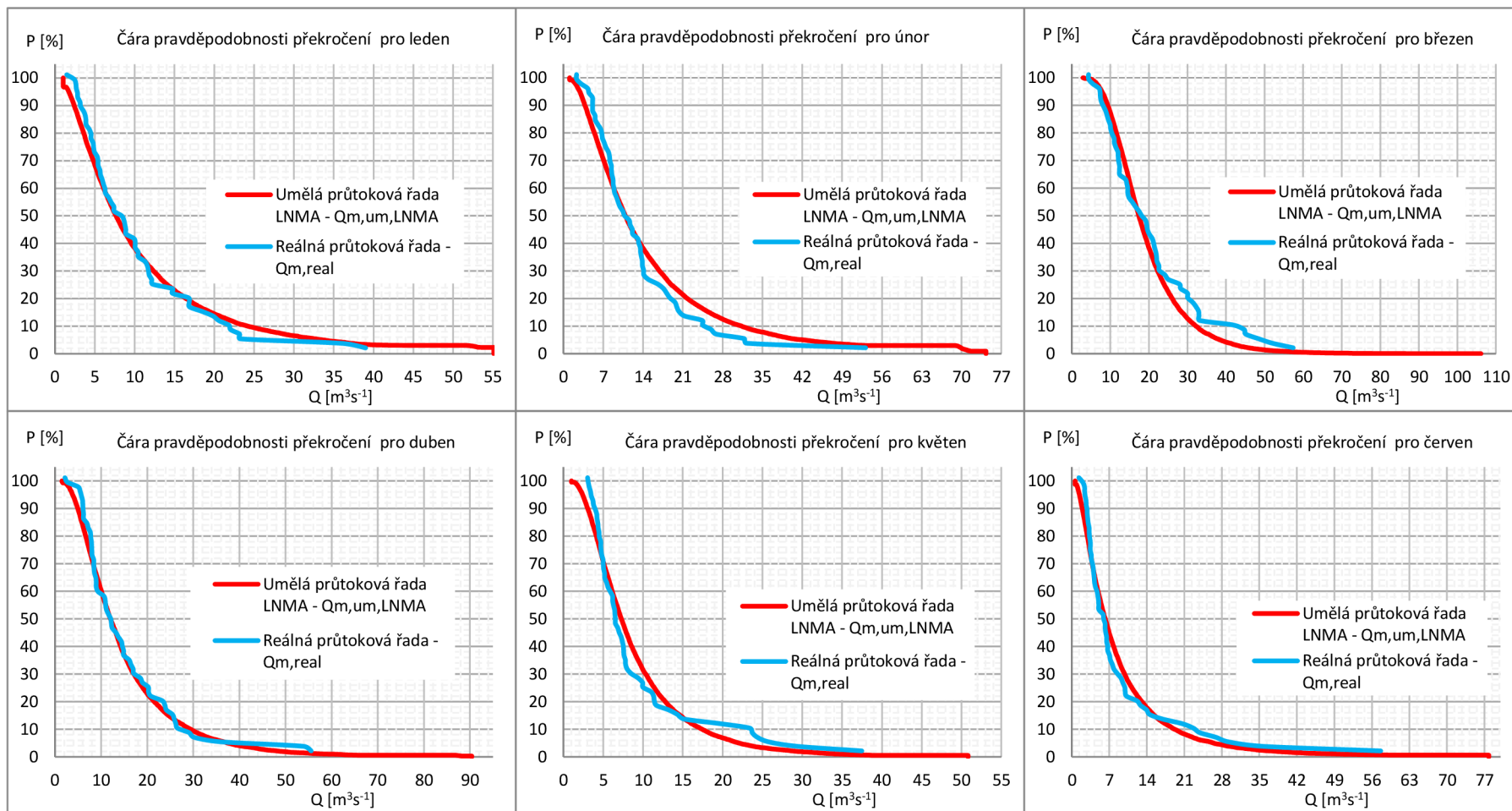


Graf 27. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

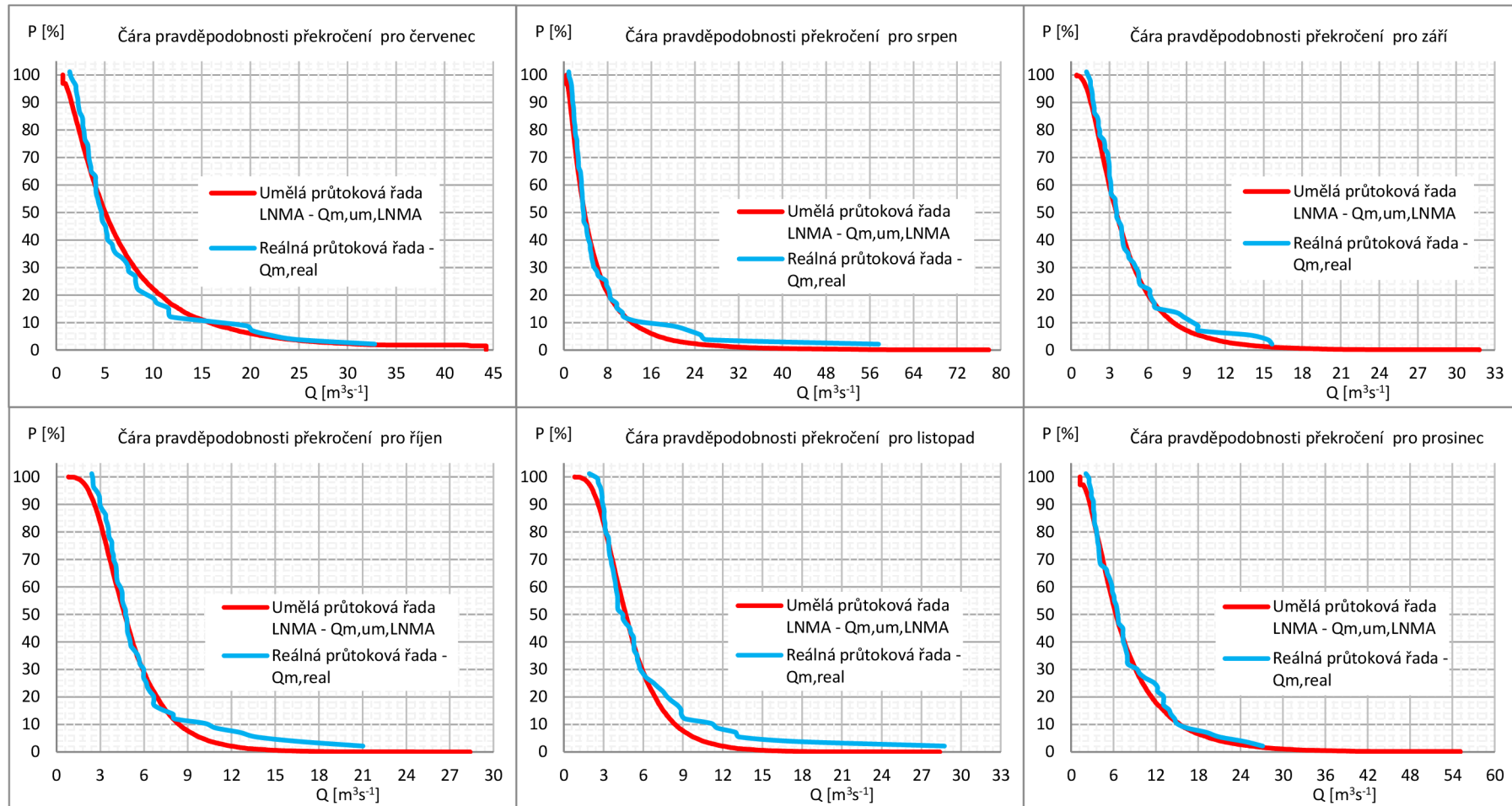
Statistické charakteristiky z generátoru LNMA tak přesné hodnoty jako předchozí umělá průtoková řada nenabízejí. Nejbližší k reálné průtokové řadě vyšel pouze koeficient excese. Podobně, ne ovšem nejpřesněji, k reálné průtokové řadě vychází disperze, směrodatná odchylka a koeficient variace. Procentuální rozdíl umělé průtokové řady LNMA a reálné řady činí 19,2 %. Nejhodnější průběhy čar překročení jsou zaznamenány v měsících leden, duben, červen, červenec a prosinec.

Tabulka 11. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LNMA

Měsíc	Statistické charakteristiky LNMA					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ .s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	11,271	121,242	11,010	0,977	2,205	5,398
Únor	15,229	193,912	13,925	0,914	2,259	5,927
Březen	19,503	98,955	9,947	0,510	1,643	5,013
Duben	15,207	139,342	11,804	0,776	2,443	9,383
Květen	9,120	46,636	6,829	0,749	2,307	8,185
Červen	9,131	94,744	9,733	1,066	3,369	16,647
Červenec	7,407	56,932	7,545	1,019	2,641	8,760
Srpen	5,804	44,292	6,655	1,147	3,963	25,765
Září	4,329	9,888	3,144	0,726	2,574	12,096
Říjen	5,187	6,418	2,533	0,488	1,625	5,117
Listopad	6,411	29,690	5,449	0,850	2,522	9,154
Prosinec	8,051	37,069	6,088	0,756	2,370	9,473



Graf 28. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um, LNMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen

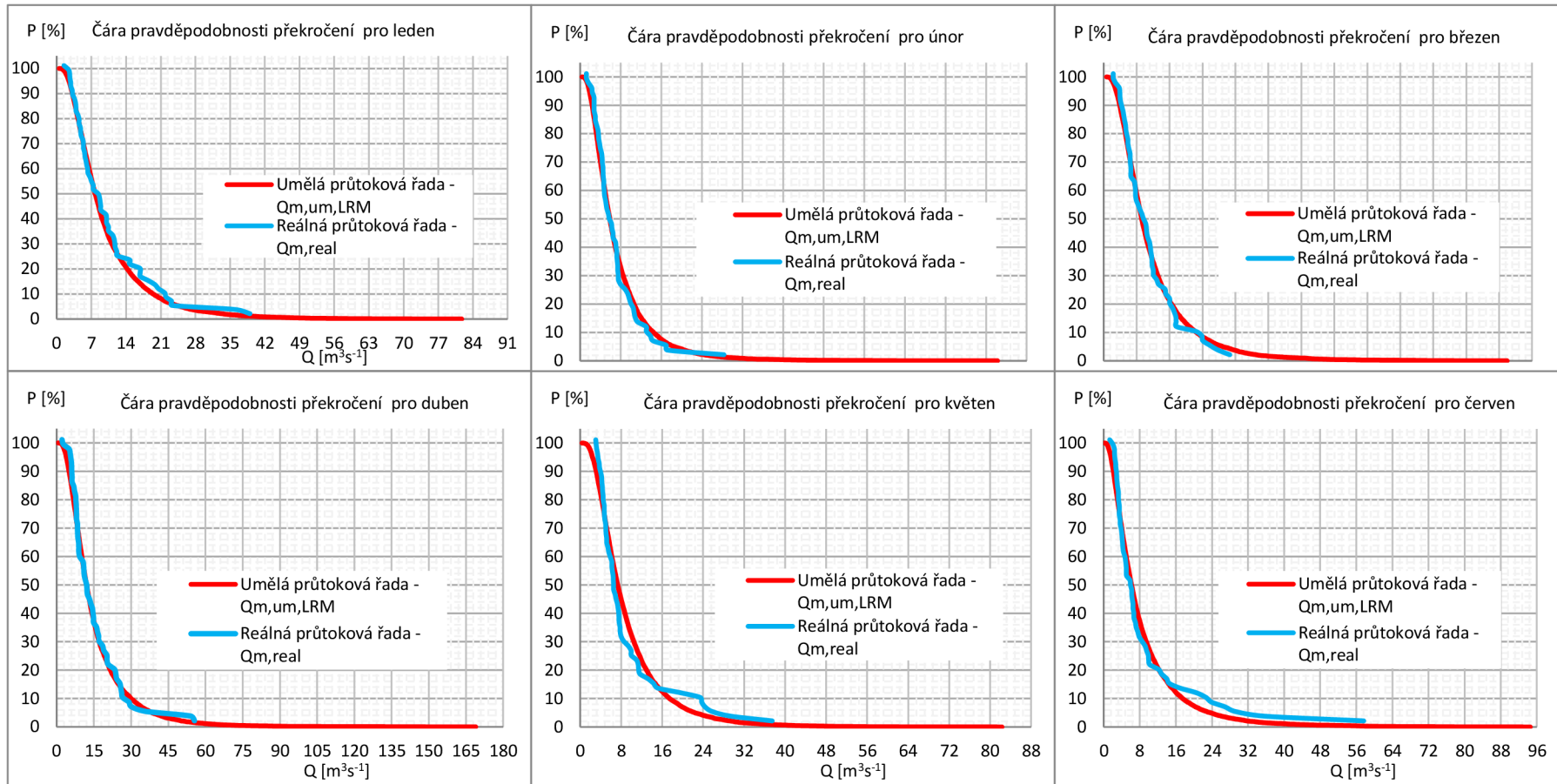


Graf 29. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

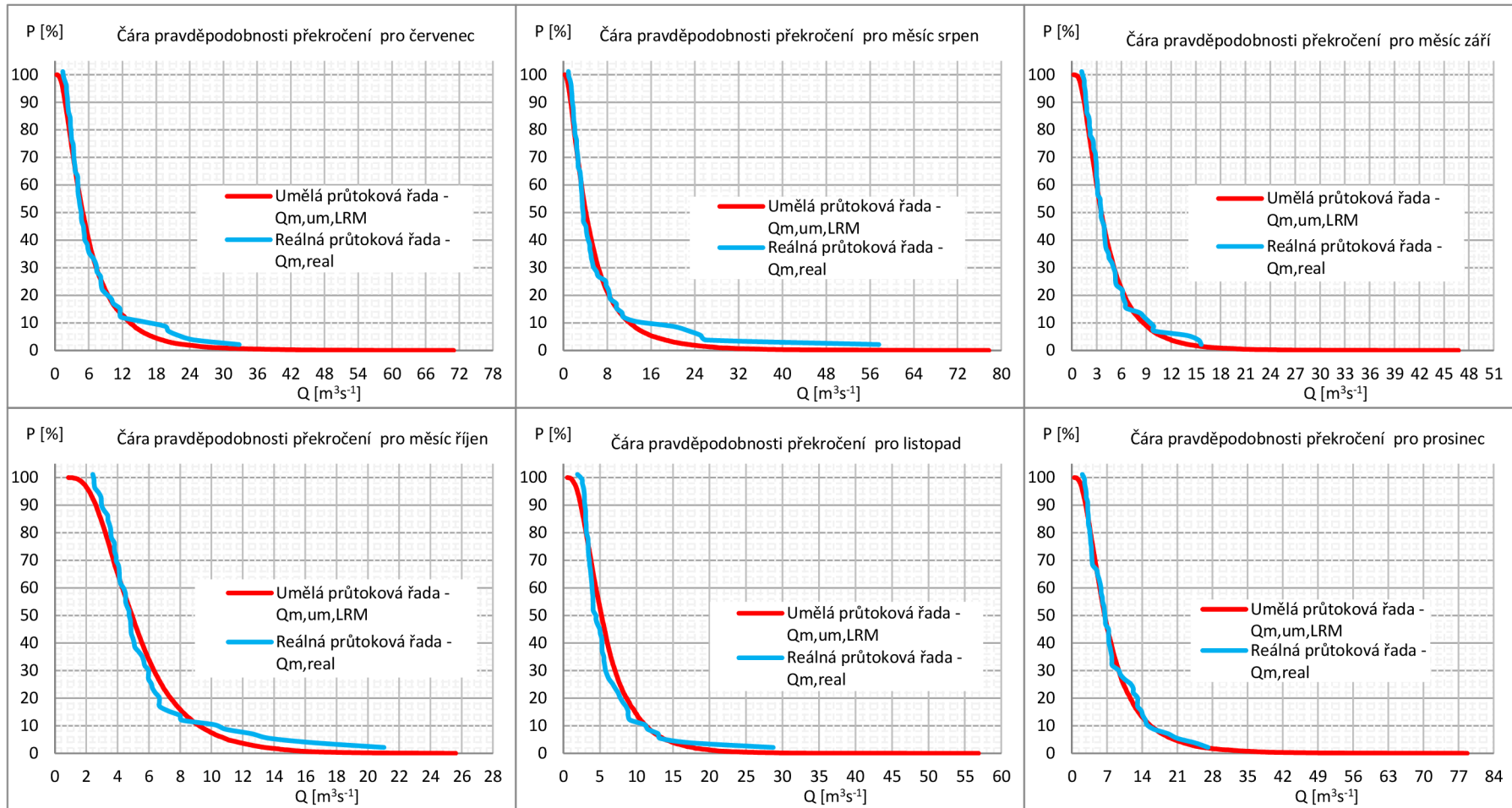
Umělá průtoková řada vygenerovaná z generátoru LRM se nejpřesněji projevila u směrodatné odchylky a koeficientu variace. Střední hodnota má druhé nejpřesnější výsledky s reálnou průtokovou řadou. Od reálné průtokové řady má procentuální rozdíl o 23,5 %. Při porovnání čar pravděpodobnosti překročení bylo dosaženo nejvíce shodných měsíců. Podobné průběhy čar jsou zaznamenány v měsíci leden, únor, březen, duben, červenec, září, listopad a prosinec.

Tabulka 12. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LRM

Měsíc	Statistické charakteristiky LRM					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ .s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	9,997	62,560	7,909	0,791	2,436	9,405
Únor	14,046	129,331	11,372	0,810	2,861	14,781
Březen	22,032	290,471	17,042	0,774	2,583	11,163
Duben	15,462	153,248	12,379	0,801	2,885	15,522
Květen	9,244	48,555	6,968	0,754	2,451	10,174
Červen	8,575	66,328	8,144	0,950	3,038	14,827
Červenec	6,602	33,663	5,802	0,879	2,848	13,756
Srpen	5,840	34,489	5,872	1,006	3,437	20,634
Září	4,518	11,970	3,460	0,766	2,691	13,912
Říjen	5,523	8,291	2,879	0,521	1,565	3,914
Listopad	6,218	16,734	4,090	0,658	2,136	8,700
Prosinec	8,305	40,646	6,375	0,768	2,653	12,638



Graf 30. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LRM}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen

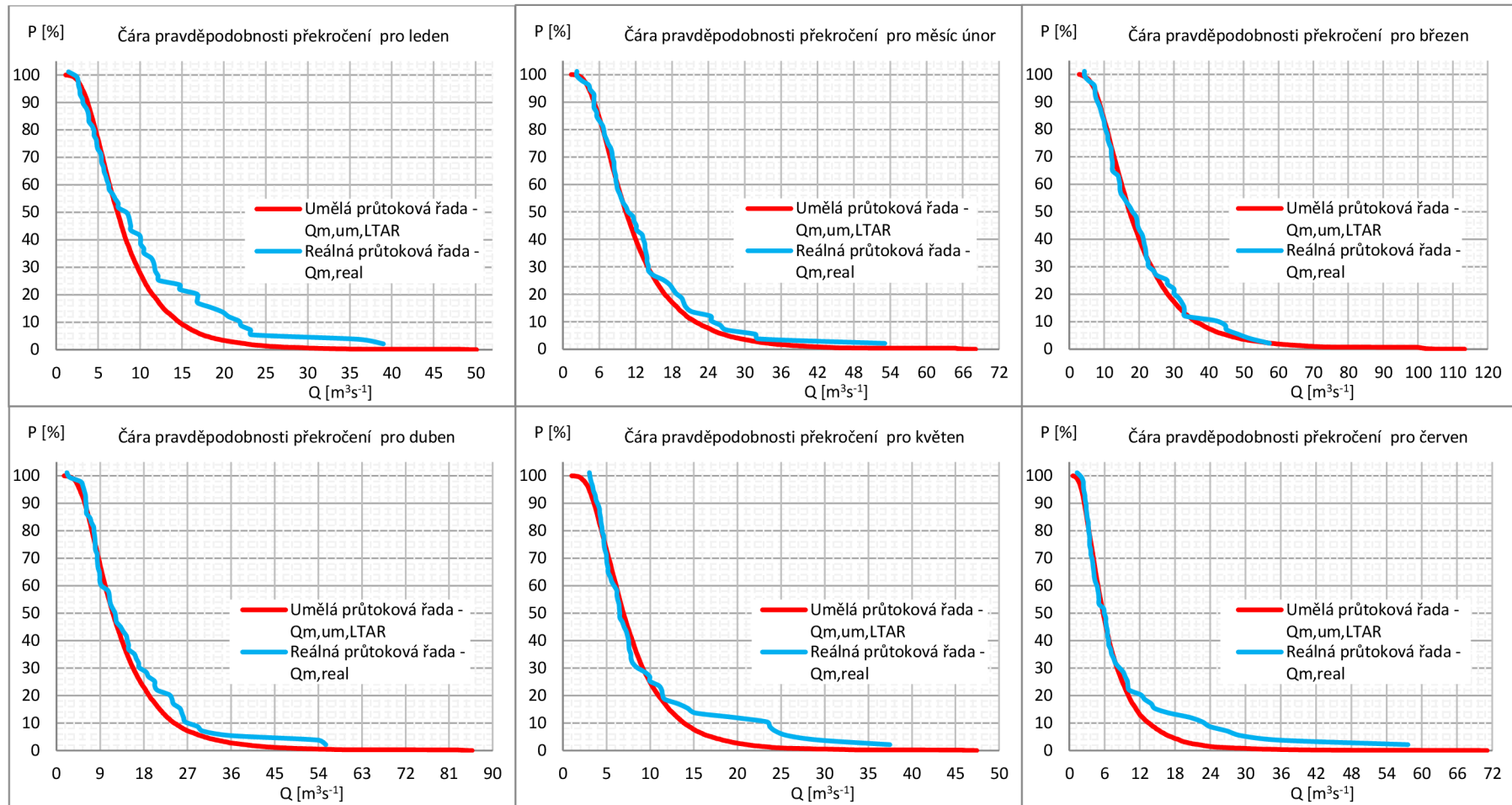


Graf 31. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LRM}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

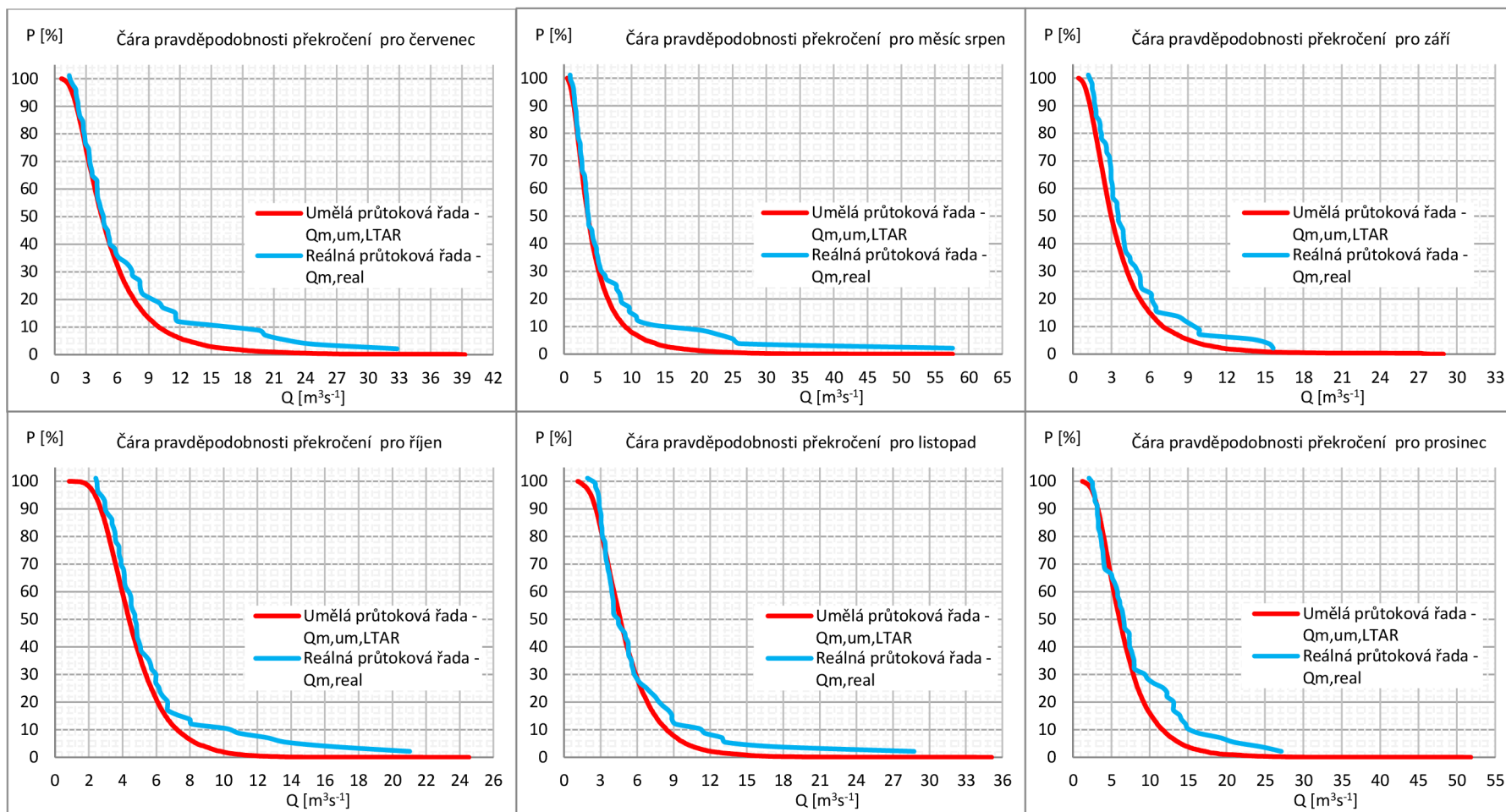
Méně přesněji vychází umělá průtoková řada LTAR. Pouze u koeficientu asymetrie a koeficientu excese hodnoty vyšly podobně jako u reálné průtokové řady. Procentuální odchylka od reálné průtokové řady činí 22,7 %. U čar pravděpodobnosti překročení jsou vidět rozdílné průběhy. Podobný průběh je zaznamenán pouze v únoru a březnu.

Tabulka 13. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LTAR

Měsíc	Statistické charakteristiky LTAR					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ .s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	8,526	26,030	5,102	0,598	2,230	9,171
Únor	12,406	62,705	7,918	0,638	2,328	9,296
Březen	20,747	184,496	13,582	0,655	2,393	9,241
Duben	13,939	81,099	9,005	0,646	2,493	11,321
Květen	8,100	23,447	4,842	0,598	2,325	10,239
Červen	7,223	29,787	5,458	0,756	2,987	17,694
Červenec	5,526	15,475	3,934	0,712	2,646	12,339
Srpen	4,710	16,706	4,087	0,868	3,105	16,197
Září	3,795	8,641	2,939	0,774	3,054	16,240
Říjen	4,752	3,704	1,925	0,405	1,385	3,879
Listopad	5,183	6,927	2,632	0,508	2,073	9,952
Prosinec	6,920	14,295	3,781	0,546	1,997	8,328



Graf 32. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

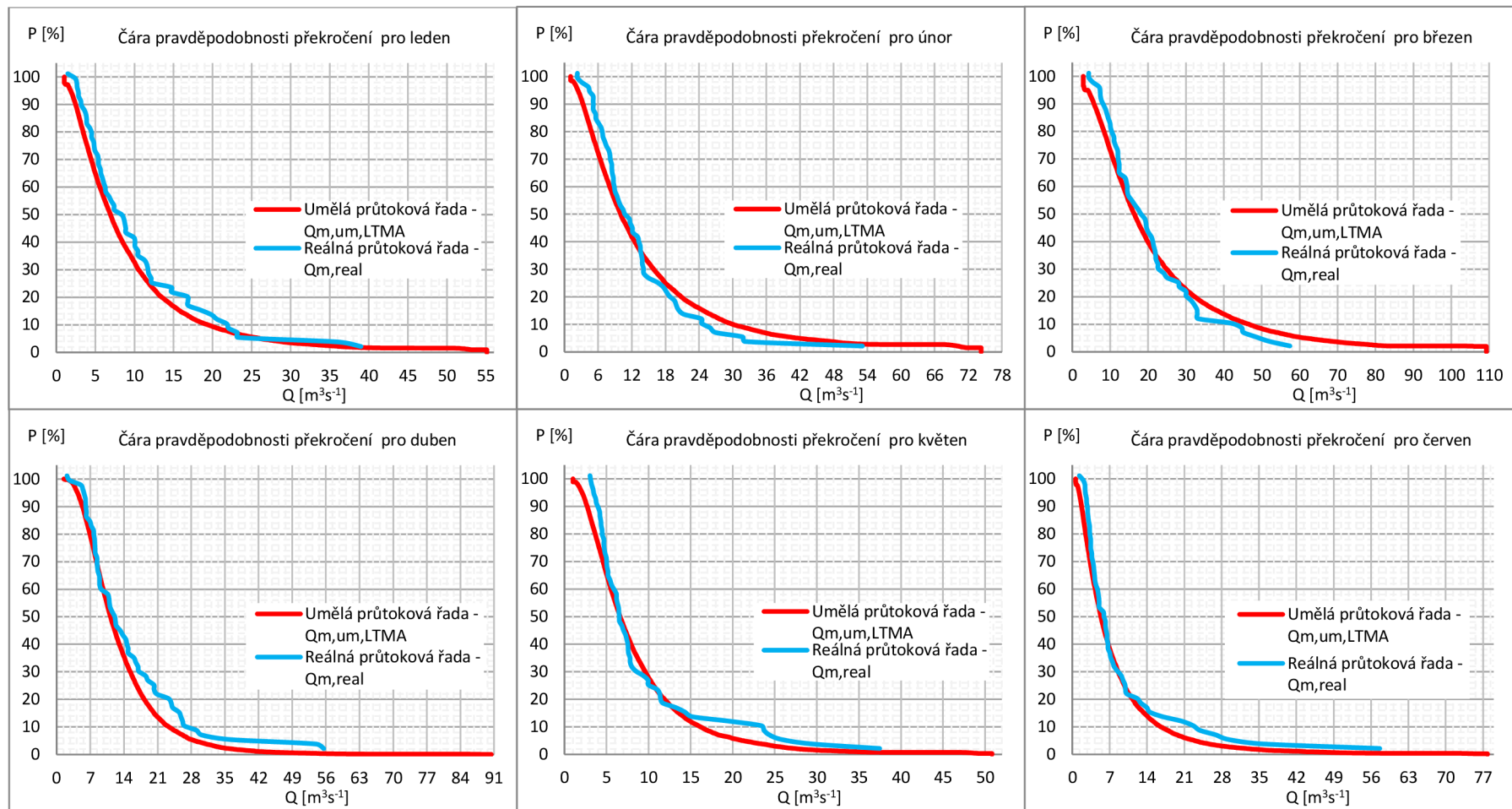


Graf 33. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

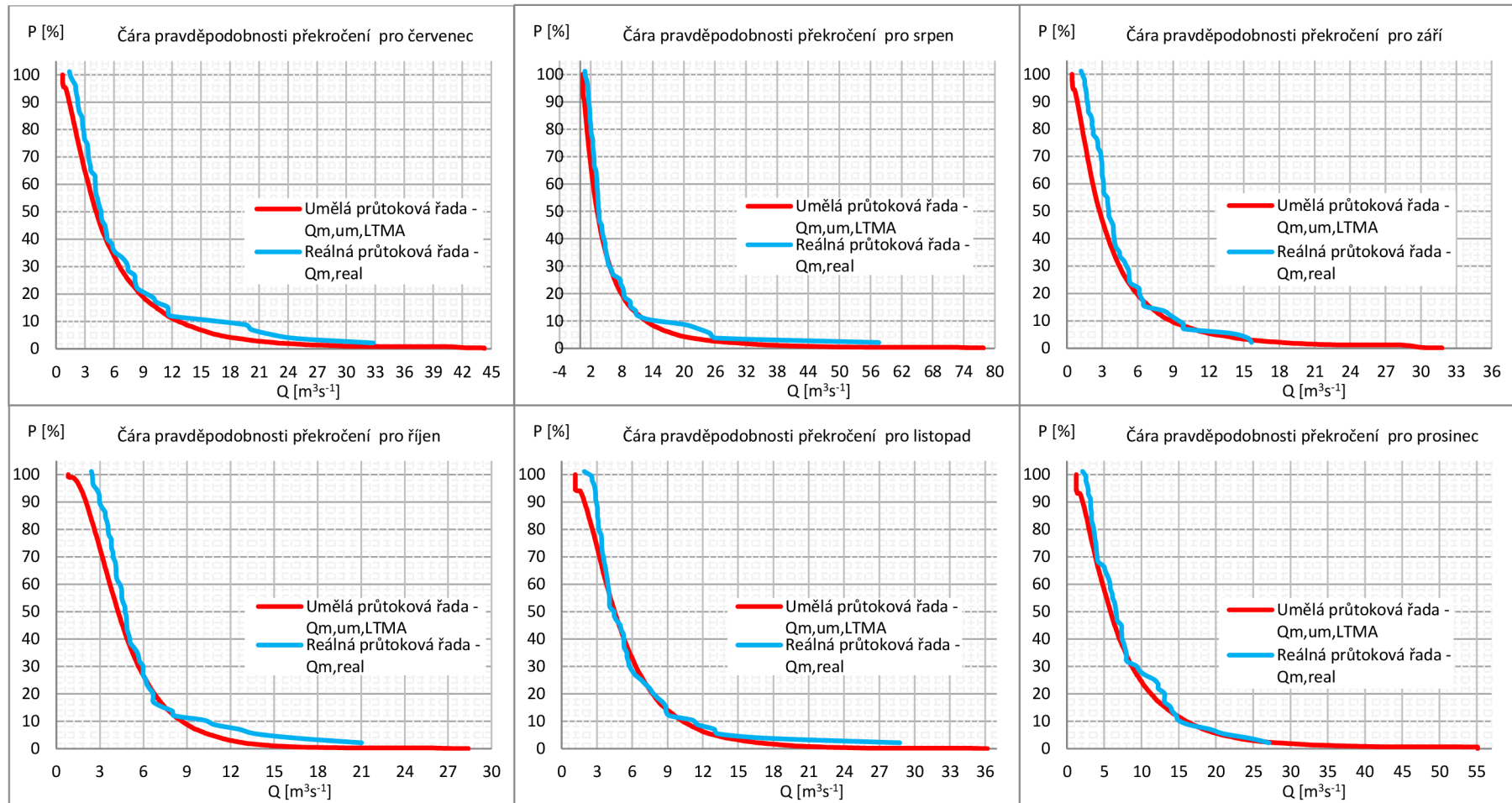
Po vyhodnocení posledního zkoumaného generátoru umělých průtokových řad bylo zjištěno, že nejbližší k průtokové řadě vyšly hodnoty pouze středních hodnot. Ostatní statistické charakteristiky se rozcházejí od reálné průtokové řady. I procentuální rozdíl, který vyšel 38,9 %, je nejvyšší ze všech zkoumaných řad. Ani čáry překročení umělé průtokové řady moc nekopírují průběh čáry překročení reálné průtokové řady. Shodné průběhy jsou vidět v grafech pro měsíc srpen, září, listopad a prosinec.

Tabulka 14. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady z generátoru LTMA

Měsíc	Statistické charakteristiky LTMA					
	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ s ⁻²]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
Leden	9,559	79,199	8,899	0,931	2,598	8,827
Únor	14,453	193,998	13,928	0,964	2,339	6,383
Březen	22,472	399,379	19,983	0,889	2,227	6,036
Duben	13,271	71,243	8,440	0,636	2,340	10,823
Květen	8,471	45,640	6,755	0,798	2,566	10,045
Červen	7,944	72,714	8,527	1,073	3,550	19,331
Červenec	6,004	35,608	5,967	0,994	2,905	12,155
Srpen	5,719	62,615	7,913	1,384	4,434	28,585
Září	4,194	20,656	4,545	1,084	3,047	12,142
Říjen	4,945	9,149	3,025	0,612	2,171	9,037
Listopad	5,528	15,554	3,944	0,713	2,267	8,802
Prosinec	7,922	52,628	7,254	0,916	2,932	12,905

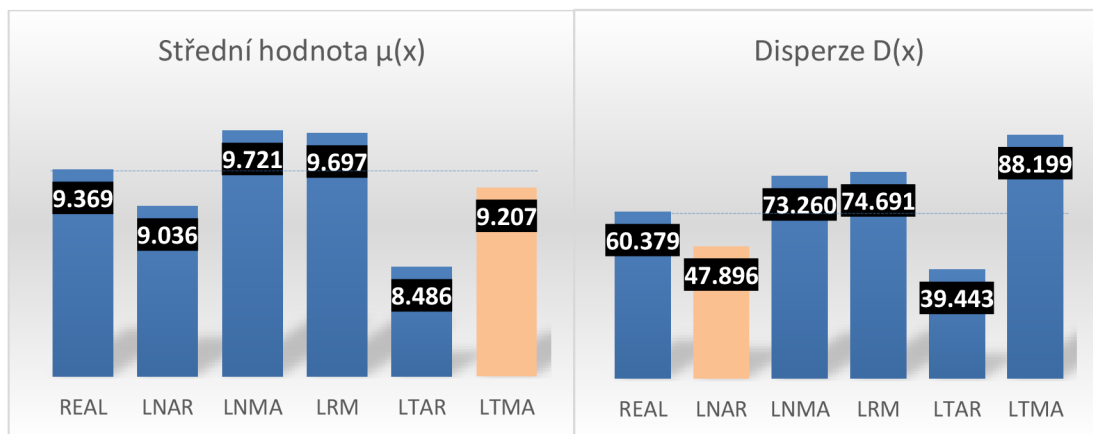


Graf 34. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen



Graf 35. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec

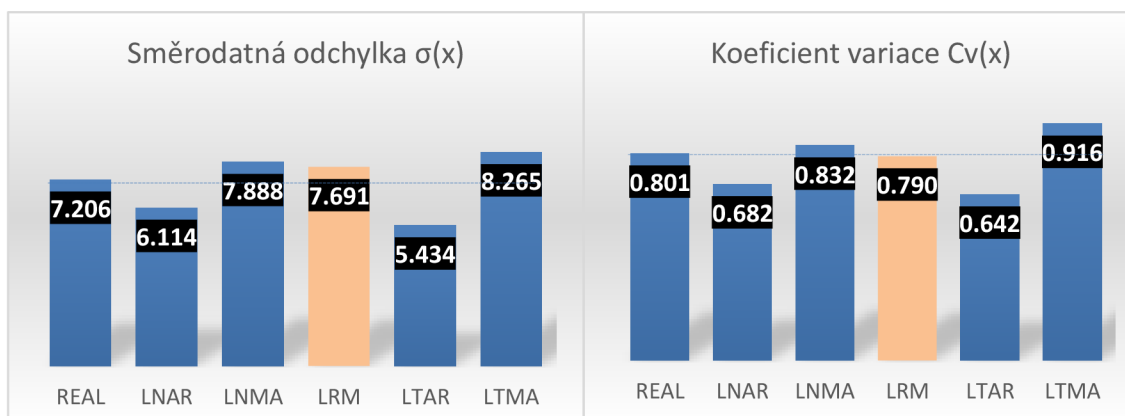
Pro přehlednější porovnání statistických charakteristik reálné průtokové řady s umělými průtokovými řadami byly vytvořeny grafy, které názorně reprezentují průměrné hodnoty jednotlivých statistických charakteristik.



Graf 36. Porovnání průměrných středních hodnot a disperse umělých průtokových řad od reálné průtokové řady

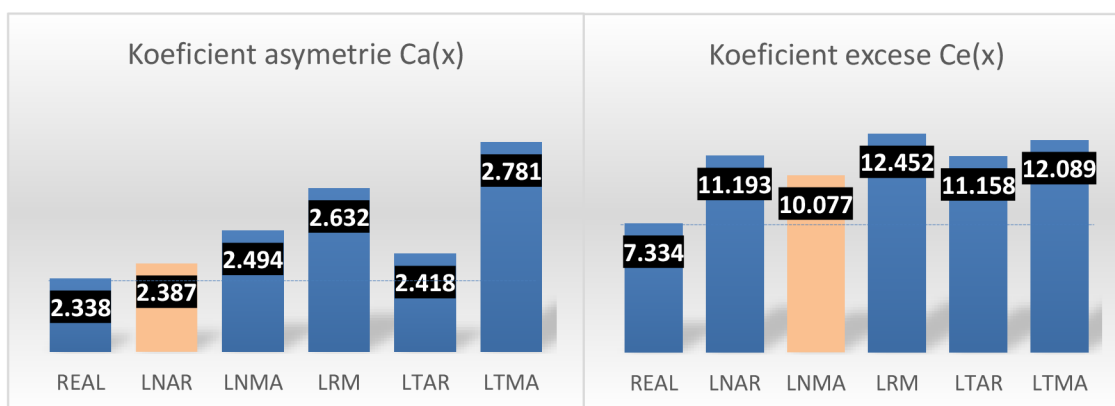
Jak je možné pozorovat z grafu 36 průměrná střední hodnota reálné průtokové řady vyšla $9,369 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nejshodněji vyšla umělá průtoková řada z generátoru LTMA s průměrnou střední hodnotou $9,207 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Naopak nejhorší výsledek vyšel pro generátor LTAR.

U disperse se průměrná hodnota reálné průtokové řady vyšplhala na $60,379 \text{ m}^6\text{s}^{-2}$. S nejbližší průměrnou hodnotou vyšla umělá řada z generátoru LNAR.



Graf 37. Porovnání průměrných směrodatných odchylek a koeficientu variace umělých průtokových řad od reálné průtokové řady

U směrodatné odchylky i u koeficientu variace vyšla nejlépe umělá průtoková řada z generátoru LRM. Vychýlení od reálné průtokové řady je nepatrné. Směrodatná odchylka umělé průtokové řady z generátoru LRM se liší od reálné průtokové řady pouze o $0,485 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a koeficient variace o 0,011. V obou případech nejhůře vyšly umělé průtokové řady z generátoru LTAR.



Graf 38. Porovnání průměrných koeficientu asymetrie a koeficientů excese umělých průtokových řad od reálné průtokové řady

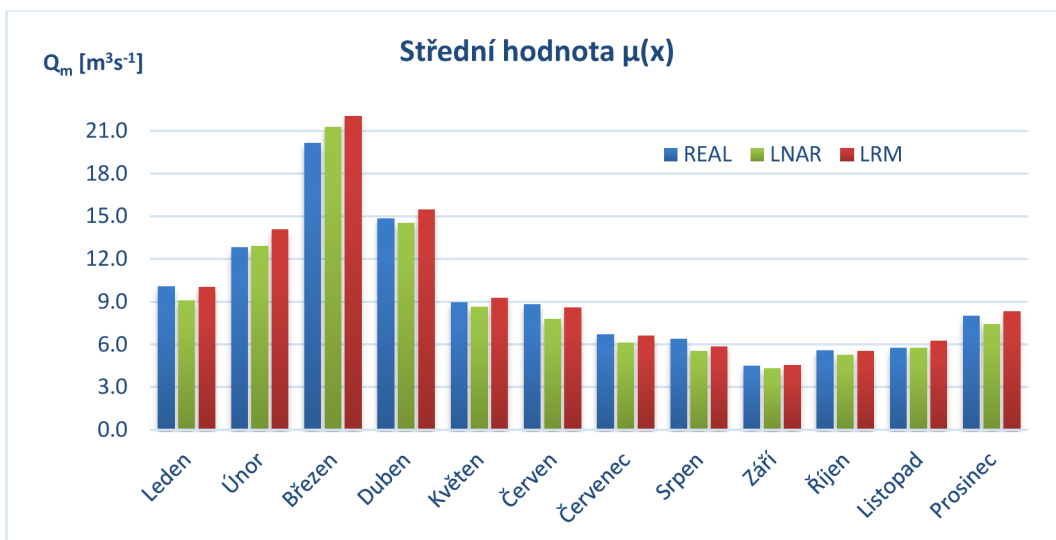
U koeficientu asymetrie je zřejmé, že nejlépe vyhověla umělá průtoková řada z generátoru LNAR, kdy rozdíl od reálné průtokové řady vyšel minimální. Výrazně převyšuje generátor LTMA, který se nejvíce odlišuje od koeficientu asymetrie reálné průtokové řady. Koeficient excese má nejbližší průběh s reálnou průtokovou řadou u umělé průtokové řady z generátoru LNMA.

Statistické charakteristiky byly prozkoumány i procentuálním rozdílem od reálné průtokové řady. Nejmenší rozdíl je zaznamenán u umělé průtokové řady LNAR a LNMA. Nejhůře dopadl generátor LTMA, který má největší rozdíl od reálné průtokové řady.

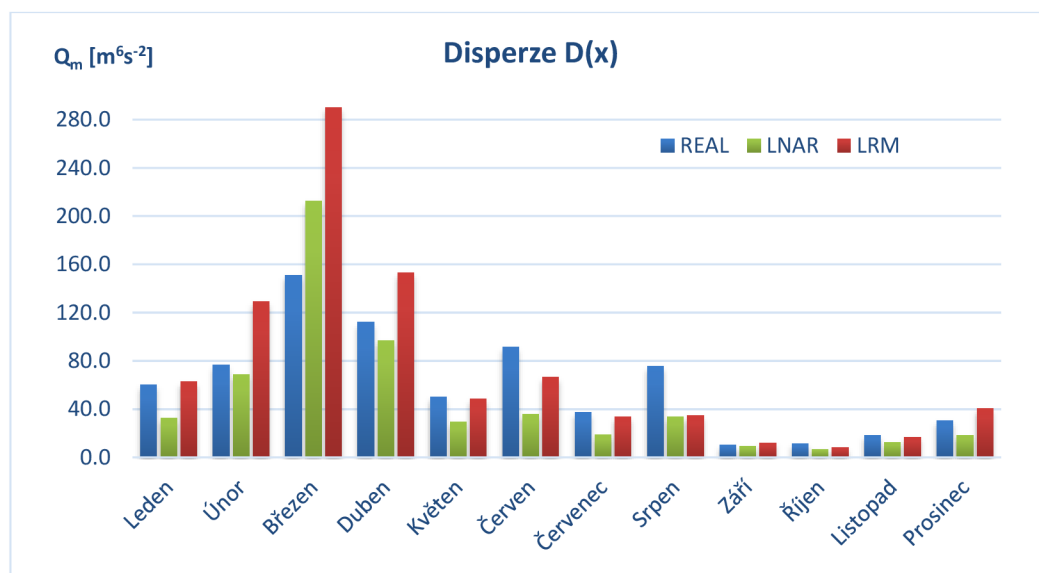
	rozdíl od reálné průtokové řady
Umělá průtoková řada LNAR	→ 11,5 %
Umělá průtoková řada LNMA	→ 19,2 %
Umělá průtoková řada LRM	→ 23,5 %
Umělá průtoková řada LTAR	→ 22,7 %
Umělá průtoková řada LTMA	→ 38,9 %

Po celkovém prozkoumání a rozebrání statistických charakteristik umělých průtokových řad z pěti různých generátorů, byly vybrány dva nejpřesnější. Nejlépe vyšel generátor LNAR, který se nejvíce shoduje u disperze a koeficientu asymetrie s reálnou průtokovou řadou. I procentuální rozdíl vyšel nejmenší od reálné průtokové řady. Dále čáry pravděpodobnosti překročení mají hodně podobné průběhy. Dalšími nejpřesnějšími generátory byly vyhodnoceny generátor LRM a generátor LNMA. Umělá průtoková řada LNMA má sice druhou nejmenší odchylku v procentech od reálné průtokové řady, ale největší shoda od reálné řady byla nelezena pouze u koeficientu excese. Podobně se projevila disperze, směrodatná odchylka a koeficient variace. Čáry pravděpodobnosti překročení mají podobné průběhy pouze u pěti měsíců. Umělá průtoková řada LRM má nejshodnější výsledky u směrodatné odchylky a koeficientu variace. Hodně přesné výsledky s reálnou řadou jsou zaznamenány i u střední hodnoty. Čáry pravděpodobnosti překročení mají nejshodnější průběhy ze všech zkoumaných generátorů. Ovšem u koeficientu asymetrie a excese se výsledky liší, proto procentuální rozdíl vyšel 23,5 %. Z důvodu přesnějších výsledků u jednotlivých statistických charakteristik a čar pravděpodobnosti překročení byl zvolen jako druhý nejpřesnější generátor.

Nejpřesněji stanovený generátor na základě zkoumání statistických charakteristik a čar pravděpodobnosti překročení je generátor LNAR. Druhý byl vyhodnocen generátor LRM. Pro porovnání reálné průtokové řady a nejpřesnějších umělých průtokových řad byly vytvořeny následující grafy pro všechny hodnocené statistické charakteristiky. U střední hodnoty v grafu 39 nejsou vidět žádné zřetelné rozdíly. Umělé průtokové řady z generátoru LNAR a LRM mají téměř shodné hodnoty jako reálná průtoková řada. Nejvyšších průtoků dosáhly všechny řady v březnu, kdy se pohybovaly průtoky okolo 20 m³s⁻¹. Naopak nejnižší průtoky okolo 5 m³s⁻¹ byly zaznamenány v měsíci září.

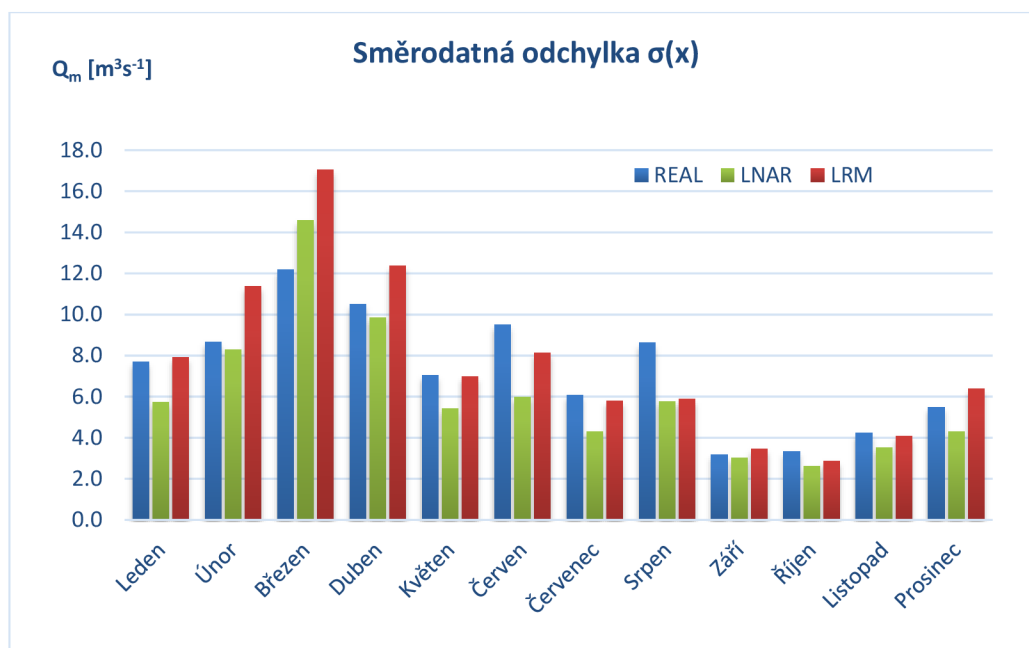


Graf 39. Porovnání střední hodnoty umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou

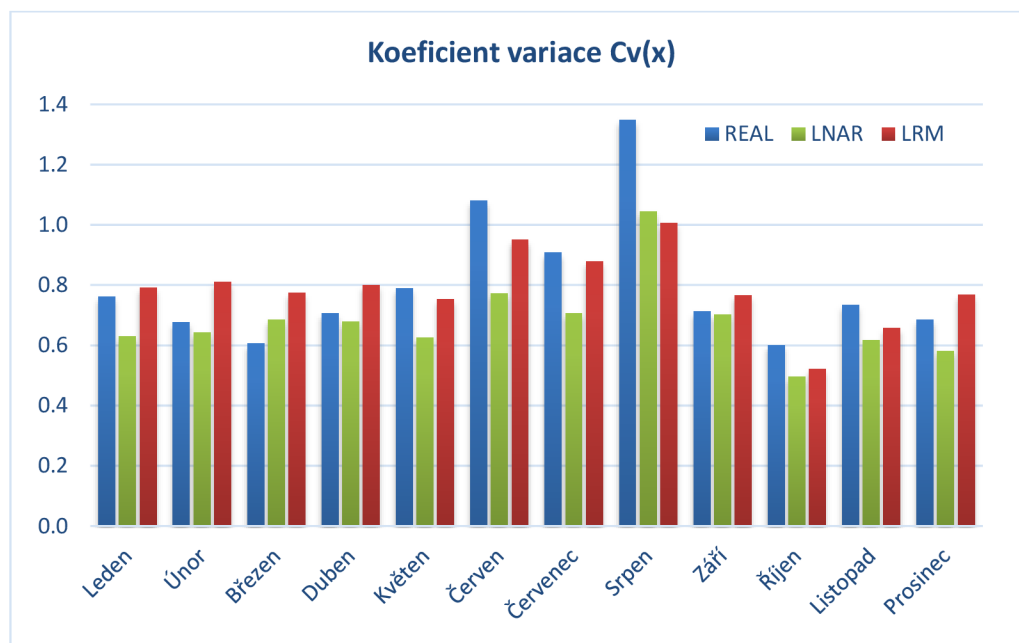


Graf 40. Porovnání disperze umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou

U disperze v grafu 40 už tak shodný průběh nezaznamenáváme. Od ledna do srpna se hodnoty výrazně liší. Největšího rozdílu dosáhla umělá průtoková řada LRM v březnu, která se od reálné průtokové řady liší o zhruba 140 m⁶s⁻². U umělé průtokové řady LNAR je rozdíl v březnu 61,5 m⁶s⁻². To nám udává největší rozptýlení hodnot od průměrného průtoku. Od září do konce roku jsou hodnoty ustálené a téměř shodné s reálnou průtokovou řadou. Podobně se jeví i porovnání směrodatné odchylky v grafu 41. Stejně jako u disperze i u směrodatné odchylky jsou výkyvy hodnot umělých průtokových řad od začátku roku do srpna oproti reálné průtokové řadě odlišné. Naopak ke konci roku se opět umělé průtokové řady přibližují k reálné řadě.



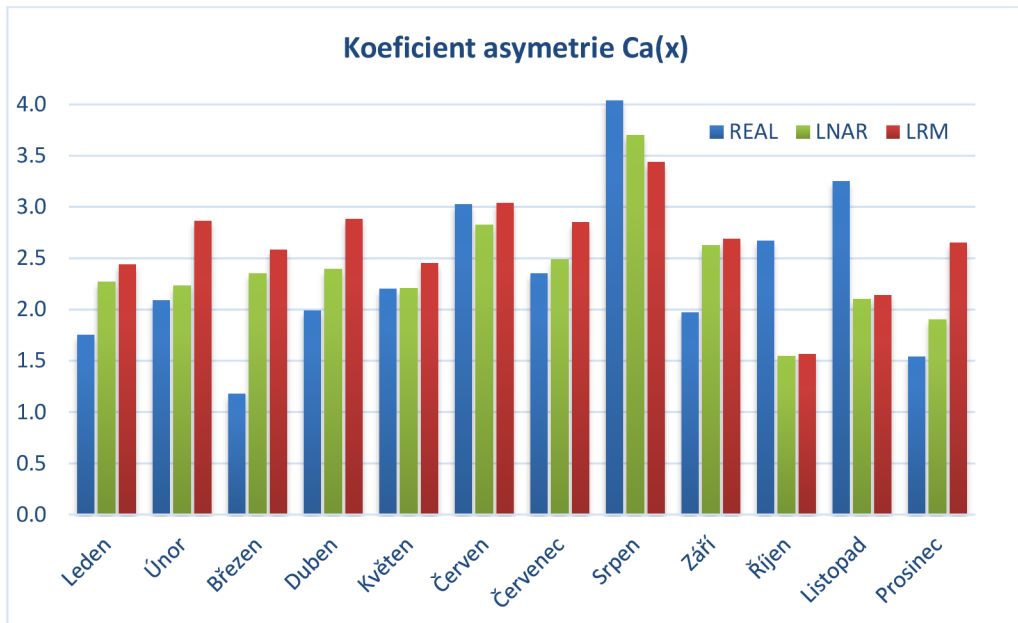
Graf 41. Porovnání směrodatné odchylky umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou



Graf 42. Porovnání koeficientu variace umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou

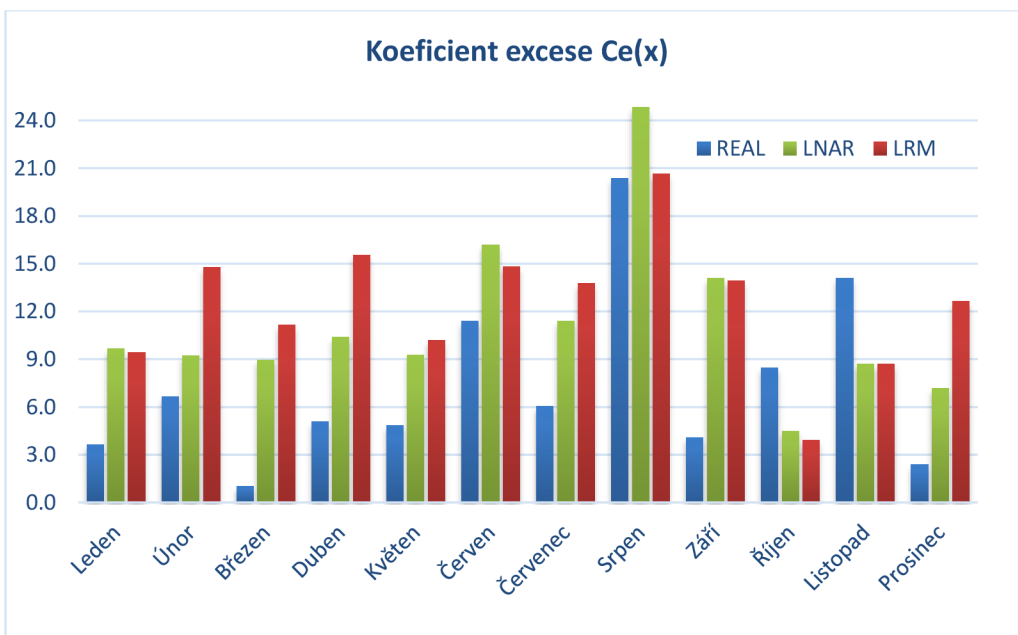
U koeficientu variace nejhodněji s reálnou průtokovou řadou vyšla umělá průtoková řada LRM. To je znázorněno v grafu 42, kde je vidět ztelnější rozdíl pouze v červnu a

srpnu. Naopak koeficientu asymetrie v grafu 43 se nejlíže k reálné průtokové řadě přiblížila reálná průtoková řada LNAR.



Graf 43. Porovnání koeficientu asymetrie umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou

Hodně rozdílný průběh hodnot umělých řad porovnáním s reálnou řadou je viděn u koeficientu excese (špičatosti) v grafu 44, jelikož nejlépe vyšla umělá průtoková řada LNMA.



Graf 44. Porovnání koeficientu excese umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou

4.7 Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže

Základní úlohou vodohospodářského řešení nádrže je výpočet zásobního objemu. V diplomové práci byl vypočítán zásobní objem nádrže Vranov pro 100 % zabezpečení. Zásobní objem je proveden simulačním modelem s uvažování i bez uvažování ztrát vody z nádrže. Průměrná roční hodnota výparu pro nádrž Vranov odpovídá hodnotě $E_a = 750$ mm a do výpočtu byly také zahrnuty ztráty výparem 600 mm a 700 mm. Ty jsou ve výpočtu spíše orientačně. Muselo by dojít k poklesu průměrných hodnot, aby se snížila hodnota výparu, což se do budoucna nepředpokládá. Důležitějšími faktory jsou ztráty výparem 800 mm a 900 mm. Důvodem je průměrné oteplování vzduchu v České republice, čímž dochází i ke zvětšování výparu. Do budoucna se tedy dá předpokládat s variantou zvětšujícího se výparu. Celá analýza je vyhodnocena v programu UNCE RESERVOIR.

V této práci je simulace zásobního objemu provedena pro reálnou průtokovou řadu měsíčních průtoků $Q_{m,real}$ a umělých průtokových řad měsíčních průtoků z pěti různých generátorů. Princip simulace je shodný pro reálnou průtokovou řadu i pro umělé průtokové řady. Liší se pouze vstupní chronologickou řadou. Jako vstupní data pro reálnou průtokovou řadu slouží historická data v podobě reálné průtokové řady délky 61 let. Data jsou pořízena od roku 1957–2017. Dalšími vstupními daty do programu jsou batygrafické křivky nádrže poskytnuté Povodím Moravy, výpar z vodní hladiny i výška hráze. Dále délka hráze ve dně a v hladině i hodnota průsaku dle empirického pozorování. Pro výpočet zásobního objemu umělých průtokových řad byly použity řady generované pomocí generátorů umělých průtokových řad LNAR, LNMA, LRM, LTAR a LTMA o délce 10 000 let. Na začátek každé umělé průtokové řady byla přidána reálná průtoková řada. Poté byly zahrnuty do programu UNCE RESERVOIR i s ostatními vstupními daty.

Po zadání vstupních dat do programu se přechází k samostatnému výpočtu. V programu se provádí různé kombinace výše zvýšených činitelů. Pro každou průtokovou řadu se zvolil vhodný interval nalepšeného odtoku O_p na základě velikosti zásobního objemu V_z nádrže a zajištění minimálního průtoku v toku pod nádrží a dalších odběrů vody dle účelu vodního díla. Po dokončení výpočtu zásobních objemů bude provedeno vyhodnocení reálné průtokové řady s umělými průtokovými řadami, stejně jako v předchozí kapitole při vyhodnocení statistických charakteristik. Manipulační řád vodní nádrže Vranov udává hodnotu zásobního objemu $V_z = 79\,668\,000$ m³ a nalepšený odtok $O_p = 4,0$ m³s⁻¹ pro 100 % zabezpečení.

4.7.1 Výpočet úlohy $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100 \%$

Zásobní objem pro 100 % zabezpečení byl vypočten pro reálnou průtokovou řadu a pro pět zkoumaných umělých průtokových řad. Výsledky jsou prezentovány v následujících podkapitolách.

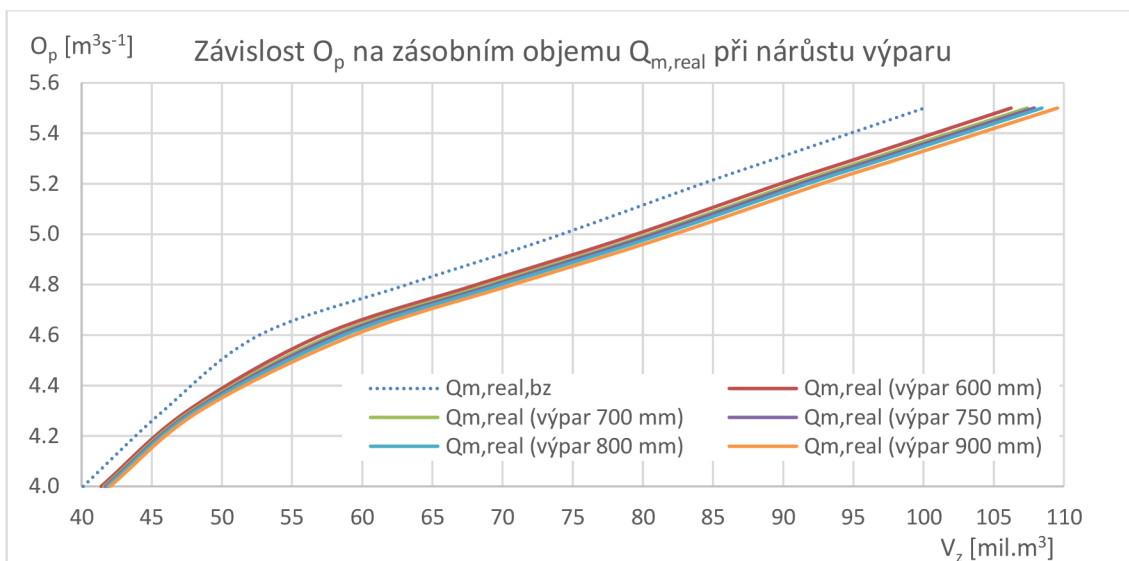
4.7.1.1 Výpočet zásobního objemu reálné průtokové řady $Q_{m,real}$

Pro výpočet zásobního objemu reálné průtokové řady byl zvolen nejlepší odtok O_p v intervalu $O_p \in (4,0; 5,5) \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Výpočet je proveden bez uvažování ztrát i s uvažováním ztrát vody z nádrže a výsledky jsou prezentovány v tabulce 15. Z výsledků je patrné, že při zvětšujícím se výparu narůstá i zásobní objem nádrže. Při výparu 750 mm, který odpovídá průměrné roční hodnotě výparu na nádrži Vranov, se zásobní objem při nejlepší odtoku $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nejméně přiblížil s hodnotou $V_z = 79\,702\,520 \text{ m}^3$ stávajícímu zásobnímu objemu nádrže. Nejlepší odtok vyšel o $0,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ více než nejlepší odtok z manipulačního řádu. Odchylna vznikla pravděpodobně z důvodu, že v hydrologických podkladech nebyly zahrnuty odběry z nádrže a z toku nad nádrží, např. vodárenský odběr pro Dukovany nebo odběr Vodárenská akciová společnost, a. s. Třebíč. Cílem výpočtu byla kontrola stávajícího zásobního objemu a ověření správnosti vstupních dat pro další výpočty.

Když se zaměříme na nárůst zásobního objemu při výparu 750 mm oproti zásobnímu objemu bez ztrát, můžeme vidět nárůst u $O_p = 4,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ o 1,7 mil.m³. Čím se zvětšuje nejlepší odtok, tím narůstá i zásobní objem. U nejlepšího odtoku $O_p = 5,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se zásobní objem zvětšil oproti zásobnímu objemu bez ztrát o 7,9 mil.m³. Můžeme tedy říct, že výpar znatelně ovlivňuje zásobní objem.

Tabulka 15. Nejlepší odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu reálné průtokové řady

O_p [m ³ s ⁻¹]	Výpar [mm]	600	700	750	800	900
	$V_{z,bz}$ [m ³]	V_z [m ³]	V_z [m ³]	V_z [m ³]	V_z [m ³]	V_z [m ³]
4,00	40 110 128	41 394 612	41 600 320	41 702 672	41 804 708	42 007 780
4,30	45 825 124	47 556 704	47 845 596	47 990 476	48 135 660	48 426 972
4,60	52 668 376	57 124 656	57 874 408	58 251 120	58 683 500	59 399 520
4,80	63 188 392	68 167 344	69 013 216	69 438 952	69 867 800	70 732 536
4,98	73 182 368	78 463 112	79 355 816	79 702 520	80 250 592	81 150 864
5,20	84 228 368	89 813 216	90 765 080	91 247 472	91 735 304	92 722 592
5,30	89 488 384	95 296 584	96 299 192	96 805 472	97 314 448	98 345 008
5,50	100 060 976	106 235 552	107 397 408	107 884 688	108 430 048	109 535 840



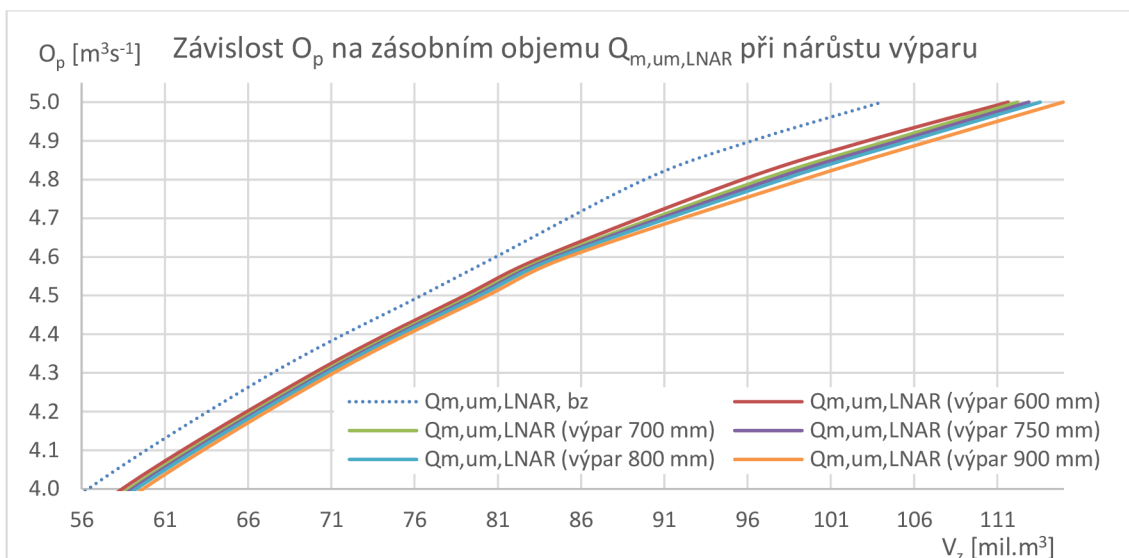
Graf 45. Závislost nalepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu reálné průtokové řady

4.7.1.2 Výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady LNAR $Q_{m,um,LNAR}$

Při výpočtu zásobního objemu u umělé průtokové řady generované v generátoru LNAR jsou zásobní objemy vyšší než zásobní objemy reálné průtokové řady. Pro $O_p = 4,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ vychází zásobní objem v průměru o 20 % více než u reálné řady. Nárůst objemu o 30 % oproti reálné průtokové řadě pozorujeme u nalepšeného odtoku $4,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nejvíce se stávajícímu zásobnímu objemu přiblížil objem $V_z = 79\,679\,264 \text{ m}^3$ u nalepšeného odtoku $O_p = 4,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Pokud by nalepšený odtok O_p byl roven jako nalepšenému odtoku u reálné průtokové řady, zásobní objem by se zvedl na hodnotu $V_z = 112\,258\,623 \text{ m}^3$.

Graf 46. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LNAR

O_p [m^3s^{-1}]	Výpar [mm]	600	700	750	800	900
	$V_{z,bz}$ [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]
3,80	51 135 092	53 171 900	53 512 336	53 683 232	53 854 620	54 198 904
4,00	56 395 092	58 435 272	58 840 080	59 051 768	59 264 416	59 690 508
4,30	67 467 400	69 964 216	70 361 936	70 559 176	70 754 296	71 134 912
4,50	76 409 392	79 006 128	79 452 944	79 679 264	79 906 928	80 367 664
4,60	80 880 384	83 706 984	84 197 880	84 446 592	84 697 520	85 206 264
4,80	89 822 400	95 706 288	96 854 680	97 464 448	98 083 512	99 332 096
4,90	96 263 264	103 179 760	104 441 528	105 080 152	105 722 864	107 019 768
4,98	103 856 624	110 625 836	111 811 247	112 258 623	113 089 921	114 500 354
5,00	104 074 392	111 654 456	112 216 352	112 892 768	113 574 336	114 952 296



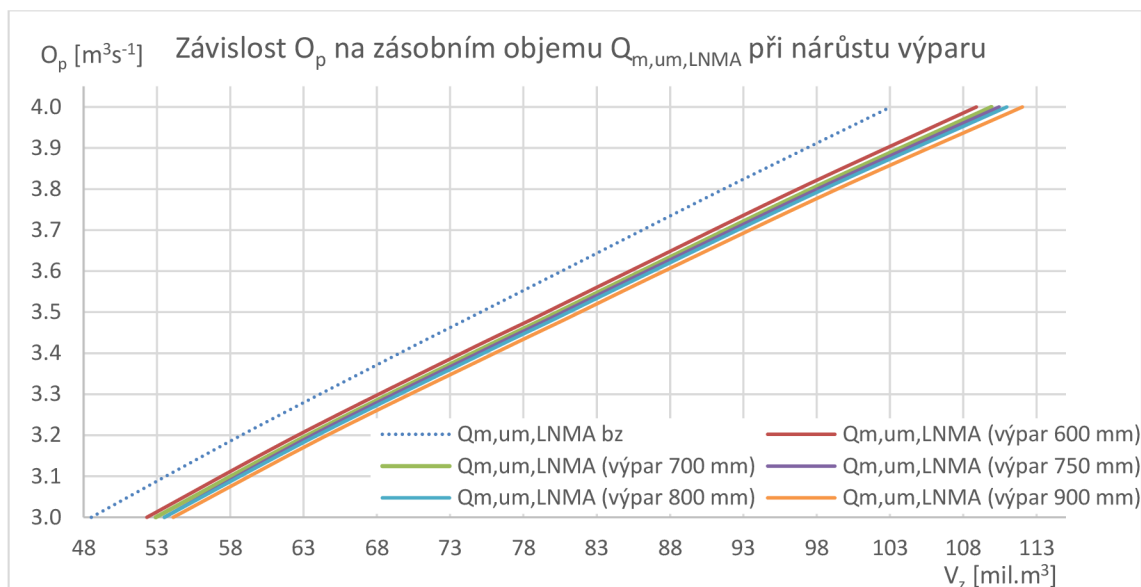
Graf 47. Závislost nalepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LNAR

4.7.1.3 Výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady LNMA $Q_{m,um,LNMA}$

Dalším použitým generátorem pro generování umělé průtokové řady byl generátor LNMA. Z výsledků prezentovaných v tabulce 16 můžeme pozorovat mnohem nižší nalepšené odtoky pro zásobní objemy než u reálné řady. Nejvíce se reálnému zásobnímu objemu přiblížil zásobní objem $V_z = 79\,564\,504\,m^3$ při $O_p = 3,48\,m^3s^{-1}$. Nalepšený odtok je o $1,5\,m^3s^{-1}$ menší než nalepšený odtok u reálné průtokové řady. Aby dosáhla umělá průtoková řada LNMA při nalepšeném odtoku $O_p = 4,98\,m^3s^{-1}$ musel by se zásobní objem zvednout na hodnotu $V_z = 162\,589\,300\,m^3$, což je v současné době velice nedostatečný zásobní objem.

Tabulka 16. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LNMA

O_p [m^3s^{-1}]	Výpar [mm]					
	$V_{z,bz}$ [m^3]	600 V_z [m^3]	700 V_z [m^3]	750 V_z [m^3]	800 V_z [m^3]	900 V_z [m^3]
3,00	48 526 128	52 316 480	52 915 240	53 511 020	53 505 080	54 113 472
3,20	58 756 836	62 608 080	63 277 432	63 611 964	63 946 440	64 615 424
3,40	69 560 880	73 796 216	74 532 976	74 905 848	75 280 128	76 037 264
3,48	73 979 280	78 432 768	79 187 816	79 564 504	79 942 464	80 702 296
3,50	75 083 880	79 573 280	80 328 408	80 707 888	81 088 664	81 854 232
3,60	80 606 864	85 261 312	86 039 352	86 429 296	86 820 184	87 605 288
3,80	91 652 880	96 733 256	97 617 888	98 058 744	98 501 608	99 408 824
4,00	103 053 928	108 894 544	109 921 200	110 441 848	110 967 552	112 034 200
4,98	151 458 928	158 254 059	160 023 687	162 589 300	163 947 254	165 859 249



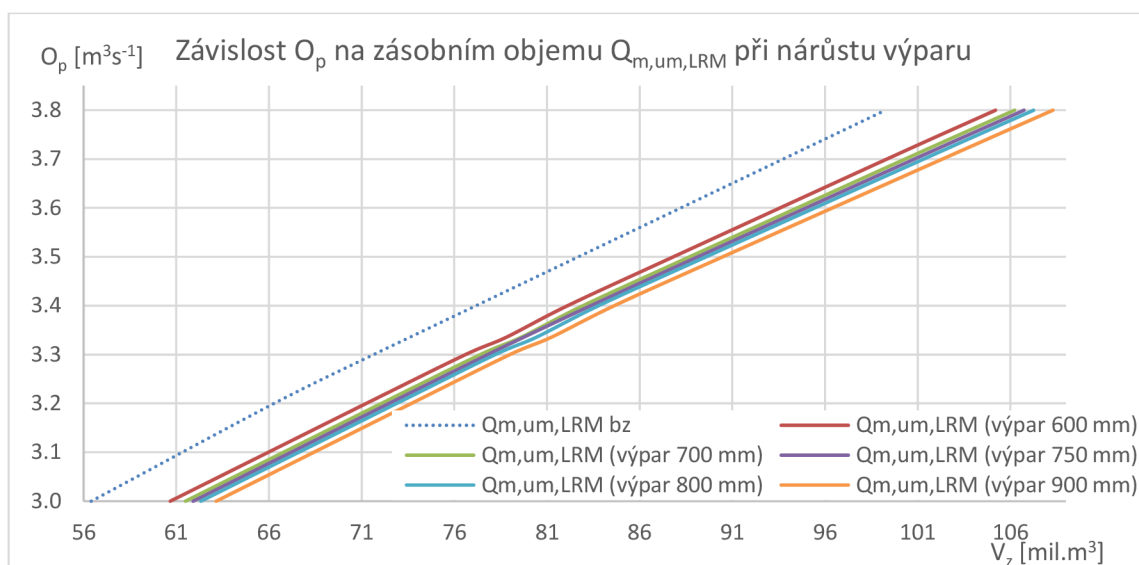
Graf 48. Závislost nejlepšího odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LNMA

4.7.1.4 Výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady LRM $Q_{m,um,LRM}$

Generátor LRM byl použit pro vygenerování umělé průtokové řady $Q_{m,um,LRM}$. Pro zásobní objemy byly hledány nejlepší odtoky. Pro zásobní objem $V_z = 79\,717\,408\text{ m}^3$ vyšel nejlepší odtok $3,34\text{ m}^3\text{s}^{-1}$, což je podobné předchozí umělé průtokové řadě generované z generátoru LNMA. Podobnost těchto generátorů je pozorovatelná na grafech umělých průtokových řad, kde je popsána závislost nejlepšího odtoku O_p na zásobním objemu V_z . V porovnání s reálnou průtokovou řadou je nejlepší odtok rozdílný o $O_p = 1,64\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Opět na velice nedostatečný zásobní objem umělé řady LRM $V_z = 174\,986\,659\text{ m}^3$ by musela nádrž dosáhnout při nejlepší odtoku $O_p = 4,98\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ u dané průtokové řady.

Tabulka 17. Nejlepší odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LRM

O_p [m^3s^{-1}]	Výpar [mm]	600	700	750	800	900
	$V_{z,bz}$ [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]
3,00	56 410 872	60 673 104	61 496 004	61 908 768	62 322 384	63 152 304
3,20	66 273 368	71 249 504	72 069 280	72 479 128	72 883 912	73 686 360
3,30	71 646 448	76 605 704	77 408 344	77 808 176	78 206 968	79 001 656
3,34	73 579 512	78 781 600	79 589 320	79 717 408	80 399 456	81 209 552
3,40	77 169 472	82 113 072	82 945 688	83 364 008	83 785 480	84 632 856
3,50	82 692 448	87 821 144	88 698 192	89 140 448	89 585 160	90 482 040
3,70	93 738 464	99 338 896	100 324 872	100 824 968	101 323 616	102 335 648
3,80	99 261 448	105 204 152	106 229 376	106 742 104	107 257 568	108 300 688
4,98	167 528 946	173 059 587	174 106 593	174 986 659	176 254 100	177 657 731



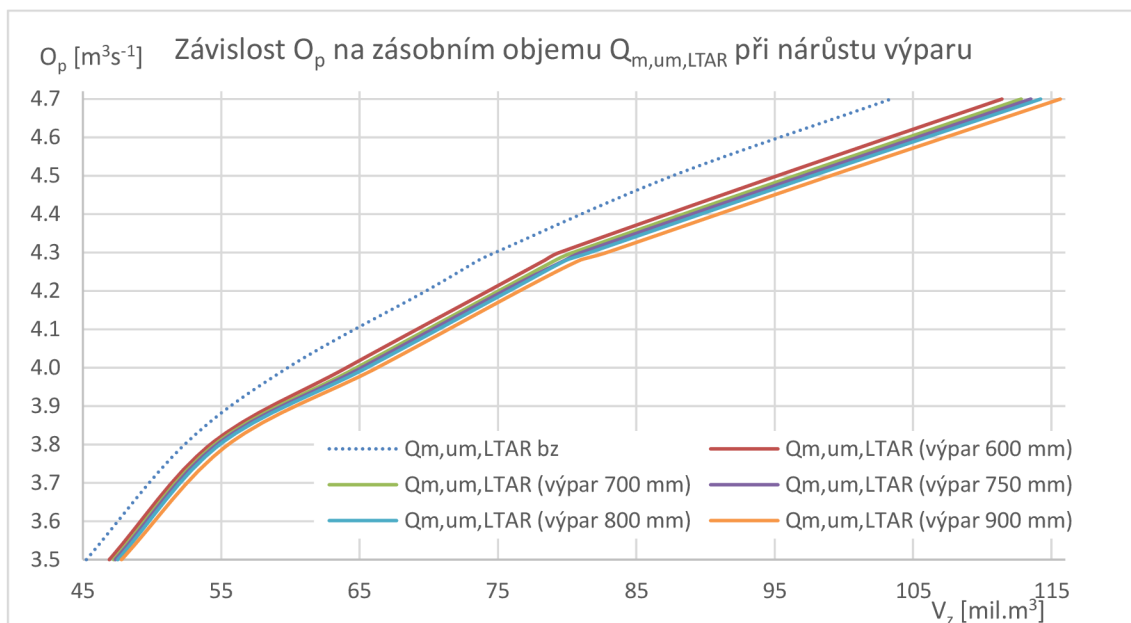
Graf 49. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LRM

4.7.1.5 Výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady LTAR $Q_{m,um,LTAR}$

Nalepšené odtoky pro jednotlivé zásobní objemy umělé průtokové řady z generátoru LTAR se zase více přibližují k hodnotám z reálné průtokové řady $Q_{m,real}$. Zásobnímu objemu $V_z = 79\,837\,160\text{ m}^3$ odpovídá nalepšený odtok $O_p = 4,28\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Ten se od reálné průtokové řady liší o $1,0\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Daný nalepšený odtok umělé průtokové řady LTAR je nejbližší k nalepšenému odtoku udávajícího z manipulačního řádu, ve kterém se udává hodnota $O_p = 4,0\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U umělé řady LTAR by se hodnota zásobního objemu pro nalepšený odtok $O_p = 4,98\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ musela vyšplhat na $V_z = 135\,711\,485\text{ m}^3$.

Tabulka 18. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LTAR

O_p [m^3s^{-1}]	Výpar [mm]					
	$V_{z,bz}$ [m^3]	600 V_z [m^3]	700 V_z [m^3]	750 V_z [m^3]	800 V_z [m^3]	900 V_z [m^3]
3,50	45 249 152	46 909 676	47 222 952	47 343 488	47 515 928	47 788 048
3,80	52 350 148	54 214 460	54 534 892	54 696 672	54 900 236	55 509 184
4,00	59 800 940	64 047 848	64 775 824	65 143 436	65 514 524	66 264 152
4,20	69 794 928	74 292 480	75 041 920	75 417 680	75 792 976	76 544 560
4,28	73 593 584	78 377 888	79 148 704	79 837 160	79 927 536	80 914 128
4,30	74 791 960	79 426 904	80 402 576	81 011 280	81 620 480	82 840 384
4,50	87 621 072	95 178 104	96 447 648	97 085 640	97 725 528	99 016 544
4,70	103 401 056	111 423 000	112 811 480	113 513 992	114 218 232	115 642 384
4,98	121 260 320	131 529 632	133 595 210	135 711 485	137 030 369	138 996 598



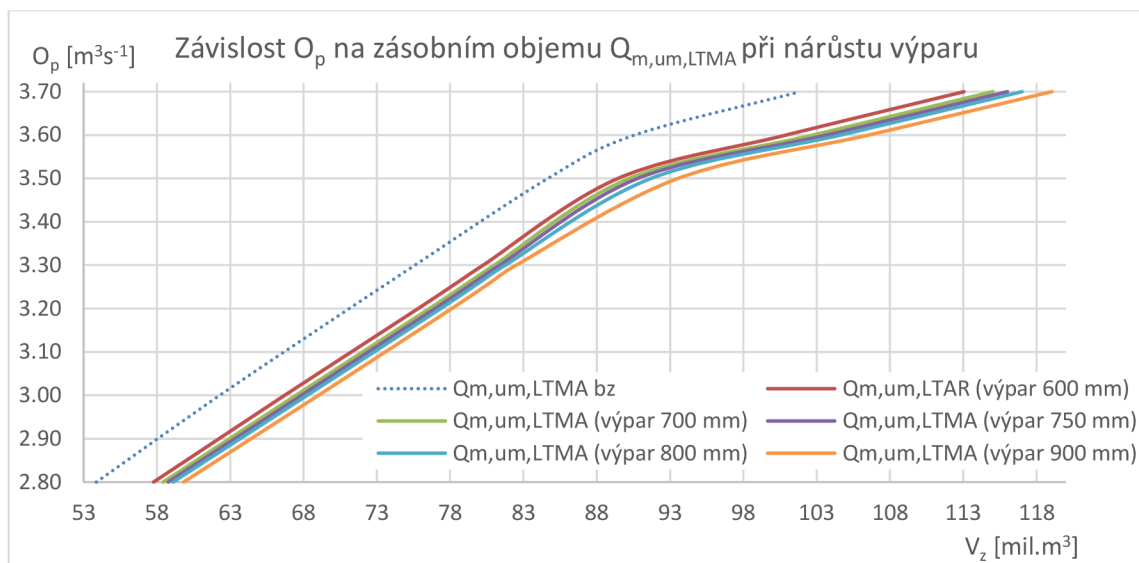
Graf 50. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LTAR

4.7.1.6 Výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady LTMA $Q_{m,um,LTMA}$

Poslední řešená umělá průtoková řada z generátoru LTMA má prezentované výsledky v tabulce 19. Po rozebrání a vyhodnocení nalepšených odtoků a zásobních objemů bylo zjištěno, že tato umělá průtoková řada má nejméně velmi shodné výsledky s reálnou průtokovou řadou. Pro zásobní objem $V_z = 79\,621\,752\text{ m}^3$ byl vypočten nalepšený odtok $O_p = 3,26\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Tento nalepšený odtok se nejméně shoduje s výsledky reálné průtokové řady i s manipulačním řádem, který uvádí hodnotu $O_p = 4,0\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Jednoznačně nejvyššího zásobního objemu $V_z = 275\,634\,485\text{ m}^3$ by musela dosáhnout nádrž pro nalepšený odtok $O_p = 4,98\text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabulka 19. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LTMA

O_p [m^3s^{-1}]	Výpar [mm]		600	700	750	800	900
	$V_{z,bz}$ [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]	V_z [m^3]
2,80	53 870 288	57 768 760	58 432 540	58 766 716	59 102 464	59 822 860	
3,00	62 286 288	66 719 240	67 483 088	67 866 712	68 251 464	69 024 376	
3,20	71 125 720	75 818 744	76 587 528	76 971 352	77 354 808	78 114 104	
3,26	73 808 312	78 487 896	79 244 824	79 621 752	79 997 664	80 746 504	
3,30	75 596 712	80 253 440	81 006 848	81 382 040	81 756 256	82 502 024	
3,50	84 667 584	89 445 920	90 213 328	90 794 120	91 701 968	93 542 472	
3,60	90 582 448	100 920 696	102 750 624	103 682 464	104 629 936	106 539 320	
3,70	101 891 464	113 051 744	115 017 336	116 011 568	117 014 488	119 045 016	
4,98	258 825 678	270 986 639	272 589 362	275 634 485	277 569 841	280 297 193	



Graf 51. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LTMA

4.7.1.7 Porovnání závislostí nalepšeného odtoku a zásobního objemu nejpřesnějších generátorů

Po prozkoumání a porovnání závislostí nalepšeného odtoku na zásobním objemu umělých průtokových řad generovaných z pěti generátorů, byly výsledky porovnány s výpočtem zásobního objemu reálné průtokové řady. Nejlépe vyšel generátor umělých průtokových řad LNAR, který zároveň vyhověl i při analýze statistických charakteristik. Druhým nejshodnějším generátorem byl vyhodnocen generátor LTAR. Tento generátor při vyhodnocení statistických charakteristik vyšel s minimální shodou se statistickými charakteristikami reálné průtokové řady.

Zbylé tři generátory LNMA, LRM a LTMA vycházejí podobně. Výsledky mezi těmito generátory se liší v průměru o 10 % až 15 %, ovšem od výsledků reálné průtokové řady se liší značně. Nejvíce od výsledků reálné průtokové řady se odchyluje umělá průtoková řada generovaná z generátoru LTMA. Nalepšené odtoky pro výpar 750 mm byly zvoleny v intervalu $O_p \in \langle 2,80; 3,70 \rangle \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobní objemy vyšly v intervalu $V_z \in \langle 58\ 766\ 716; 116\ 011\ 568 \rangle \text{ m}^3$. Dané hodnoty zásobních objemů u reálné průtokové řady vycházely pro nalepšené odtoky v intervalu $O_p \in \langle 4,0; 5,5 \rangle \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Umělé průtokové řady z generátoru LNAR a LTAR vyšly nejshodněji při výpočtu zásobního objemu s reálnou průtokovou řadou. Zároveň umělá průtoková řada LNAR při vyhodnocení analýzy statistických charakteristik měla nejpřesnější výsledky. Proto je zde provedeno důkladnější porovnání obou umělých průtokových řad s reálnou průtokovou řadou, které jsou prezentovány v následujících grafech a tabulkách. Pro přehlednější

znázornění grafů a tabulky byly pro porovnání vybrány zásobní objemy bez ztrát, při výparu 600 mm, 750 mm a 900 mm.

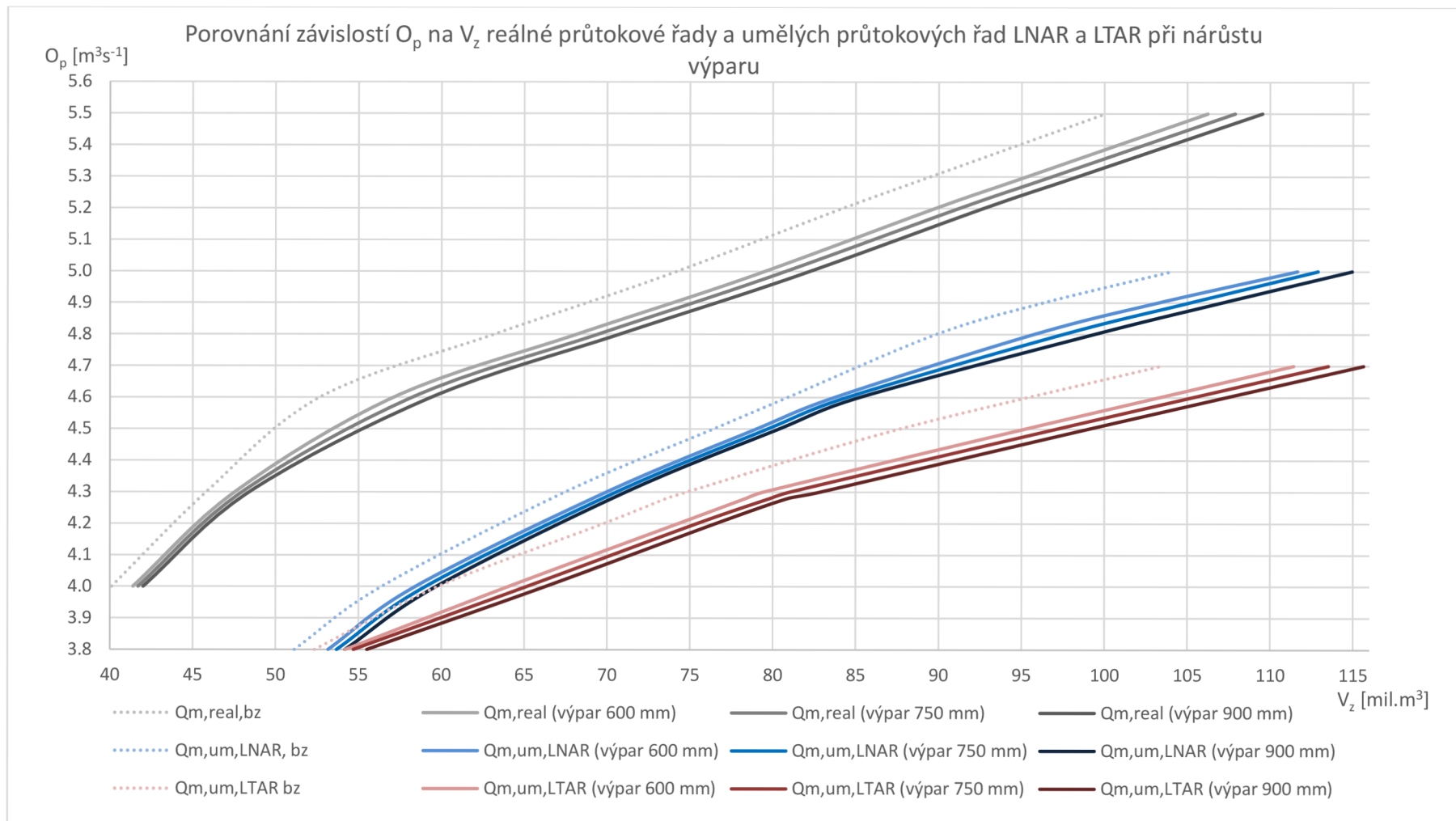
Tabulka 20. Porovnání zásobních objemů bez ztrát a při výparech 600 mm, 750 mm a 900 mm umělých průtokových řad LNAR a LTAR s reálnou průtokovou řadou

Zásobní objem bez ztrát					
$Q_{m,real}$		$Q_{m,um,LNAR}$		$Q_{m,um,LTAR}$	
O_p [m^3s^{-1}]	$V_{z,bz}$ [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	$V_{z,bz}$ [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	$V_{z,bz}$ [m^3]
4,00	40 110 128	4,00	56 395 092	3,80	52 350 148
4,60	52 668 376	4,30	67 467 400	4,00	59 800 940
4,80	63 188 392	4,50	76 409 392	4,28	73 593 584
4,98	73 182 368	4,60	80 880 384	4,30	74 791 960
5,20	84 228 368	4,80	89 822 400	4,50	87 621 072
5,30	89 488 384	5,00	104 074 392	4,70	103 401 056

Výpar 600 mm					
O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]
4,00	41 394 612	4,00	58 435 272	3,80	54 214 460
4,60	57 124 656	4,30	69 964 216	4,00	64 047 848
4,80	68 167 344	4,50	79 006 128	4,28	78 377 888
4,98	78 463 112	4,60	83 706 984	4,30	79 426 904
5,20	89 813 216	4,80	95 706 288	4,50	95 178 104
5,30	95 296 584	5,00	111 654 456	4,70	111 423 000

Výpar 750 mm					
O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]
4,00	41 702 672	4,00	59 051 768	3,80	54 696 672
4,60	58 251 120	4,30	70 559 176	4,00	65 143 436
4,80	69 438 952	4,50	79 679 264	4,28	79 837 160
4,98	79 702 520	4,60	84 446 592	4,30	81 011 280
5,20	91 247 472	4,80	97 464 448	4,50	97 085 640
5,30	96 805 472	5,00	112 892 768	4,70	113 513 992

Výpar 900 mm					
O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]	O_p [m^3s^{-1}]	V_z [m^3]
4,00	42 007 780	4,00	59 690 508	3,80	55 509 184
4,60	59 399 520	4,30	71 134 912	4,00	66 264 152
4,80	70 732 536	4,50	80 367 664	4,28	80 914 128
4,98	81 150 864	4,60	85 206 264	4,30	82 840 384
5,20	92 722 592	4,80	99 332 096	4,50	99 016 544
5,30	98 345 008	5,00	114 952 296	4,70	115 642 384



Graf 52. Porovnání závislosti nalepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z umělých průtokových řad LNAR a LTAR s reálnou průtokovou řadou

4.8 Hydrologická analýza umělé průtokové řady LNAR

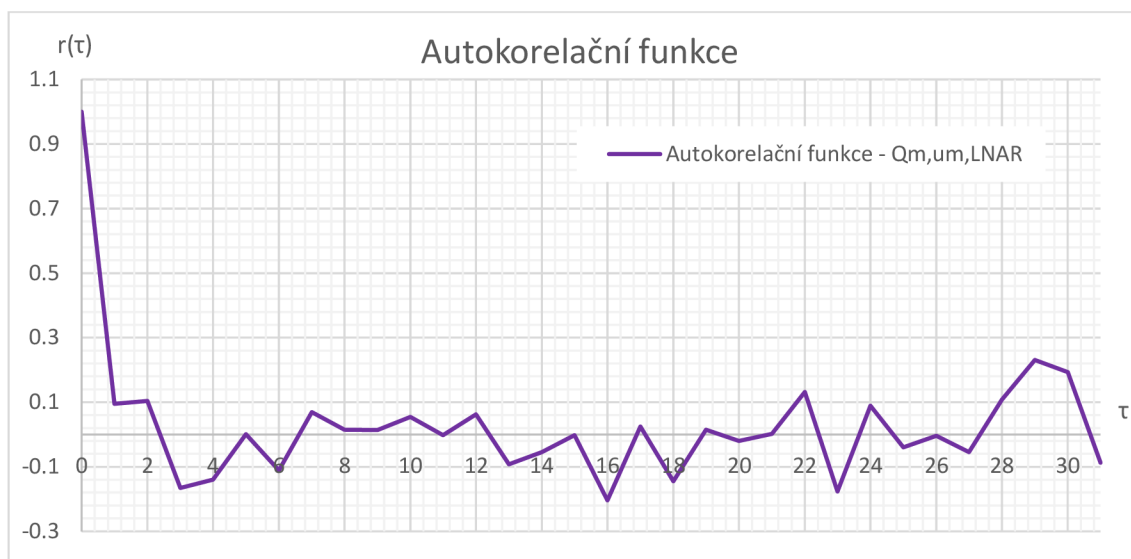
Předchozí kapitoly se zabývaly rozebráním reálné průtokové řady, jejichž výsledky se porovnávaly s výsledky umělých průtokových řad z pěti různých generátorů. Nejprve byly důkladně rozebrány statistické charakteristiky reálné průtokové řady. Nejpodobnějších výsledků dosáhla umělá průtoková řada LNAR a druhou nejvíce se shodující umělou průtokovou řadou je řada z generátoru LRM. Dále bylo pro všechny řady provedeno vodohospodářské řešení. Byl vypočten zásobní objem v závislosti na nalepšeném odtoku pro 100 % zabezpečení. Zásobní objemy se opět porovnávaly s výsledky zásobních objemů reálné průtokové řady a vyhodnotily se nejshodnější průběhy. Ve vodohospodářském řešení se nejvíce reálné průtokové řadě přiblížily umělé průtokové řady z generátorů LNAR a LTAR.

Umělá průtoková řada z generátoru LNAR měla nejshodnější průběhy výsledků ve vyhodnocení statistických charakteristik i ve výpočtu vodohospodářského řešení nádrže. Generátor LNAR byl tedy vybrán jako nejpřesnější a pro danou umělou průtokovou řadu je provedena hydrologická analýza. Z hydrologického hlediska se budou hledat podobnosti s reálnou průtokovou řadou, pro kterou byla analýza provedena v kapitole 4.3.

Pro ověření generátorů existuje celá řada testů. Nejjednodušším testem generátoru náhodných čísel je prokázání existence mezi generovanou řadou a reálnou průtokovou řadou. Spolehlivým testem generátoru je použití autokorelační funkce. Délka umělé průtokové řady $Q_{m,um,LNAR}$ je dlouhá 10 000 let. Pro analýzu bylo rozebráno prvních 100 let z řady a pracuje se průměrnými ročními průtoky. V navazujícím textu bude popsáno chování časové řady, průběh autokorelační funkce a vyhlazení jednotlivými trendovými složkami.

Průběh autokorelační funkce vypočten dle kapitoly 3.1.3 ze vztahu (3) je znázorněn v grafu 53. Na začátku funkce klesá z typické hodnoty 1, poté se průběh funkce pohybuje v pomyslných mezích $(-0,2 - 0,3)$. V autokorelační funkci umělé průtokové řady LNAR nejsou tak zřetelné lokální extrémní hodnoty jako u průběhu reálné průtokové řady. Největšího lokálního extrému umělá průtoková řada dosáhla pro $\tau = 29$ s hodnotou 0,23. Menší extrém je zaznamenán pro $\tau = 22$. Vyskytují se zde i záporné lokální extrémní hodnoty, kdy τ nabývá hodnot $\tau = 3$, $\tau = 16$ a $\tau = 23$. Ke shodě s reálnou průtokovou řadou došlo u

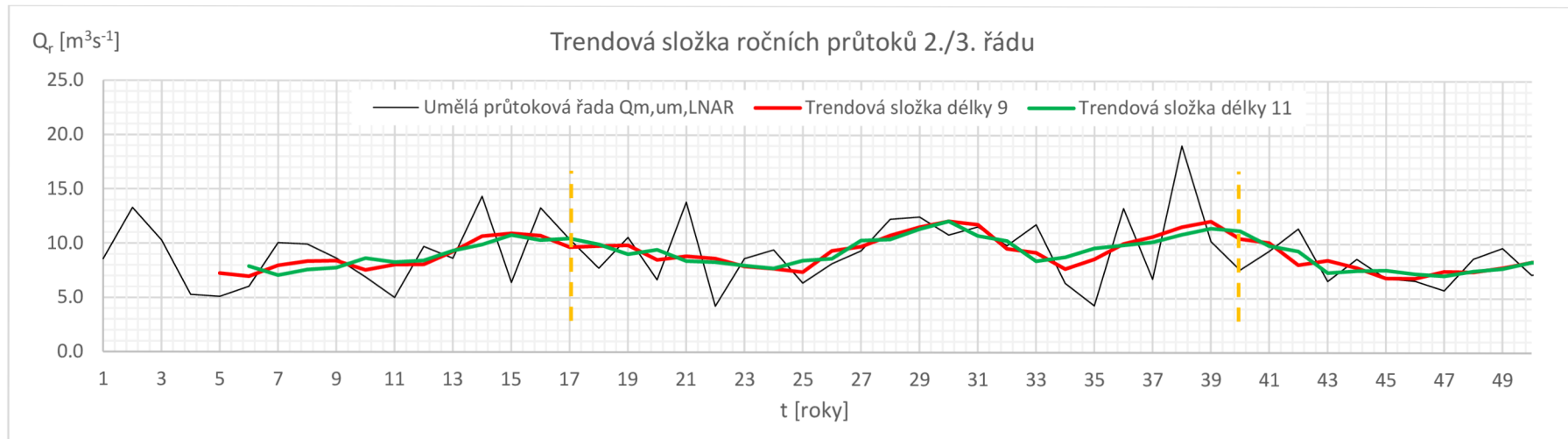
lokálního extrému $\tau = 22$, který je pro reálnou průtokovou řadu maximální. Do lokálního extrému ovšem záporného se vyšplhala reálná průtoková řada i pro $\tau = 29$.



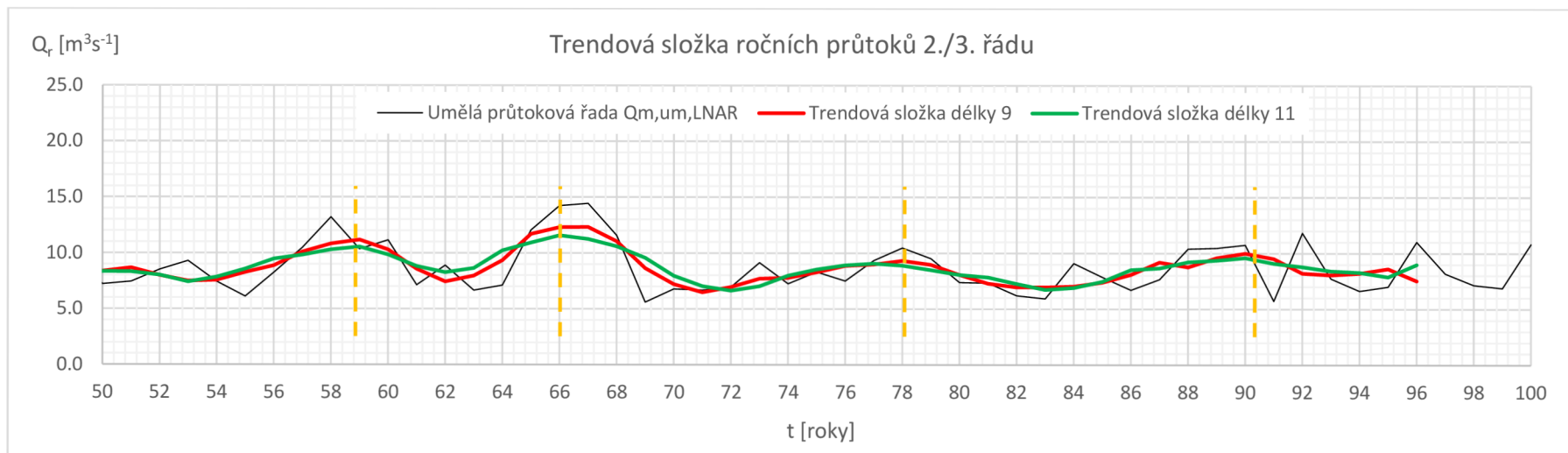
Graf 53. Autokorelační funkce umělé průtokové řady $Q_{m,um,LNAR}$

Stanovení trendových složek a hledání skrytých period v časové umělé průtokové řadě bylo sestrojeno metodou klouzavých průměrů dle tabulky 1. Ve dvou grafech 54 a 55, jejichž průběhy znázorňují roční průtoky umělé průtokové řady LNAR a klouzavé průměry délky 9 a 11, je nejprve popsáno období prvních 50 let a ve druhém grafu následujících 50 let. Výpočet trendové složky byl zvolen dle 2./3. řádu klouzavých průměrů. Výsledným reprezentativním průměrem pro popis řady ročních průtoků je vybrán průměr délky 11.

V grafech jsou čárkovanou čarou vyznačeny extrémy vyskytující se v časové řadě. Ukazuje se, že extrémy se projevují po 12 i po 22 letech. Tomu odpovídá průběh autokorelační funkce pro danou časovou řadu. Nejvodnatější období, resp. extrémy v časové řadě pro vyhlazené průměry délky 11, jsou v trendu nalezeny v letech 17, 30, 40, 59, 66, 78 a 90. Naopak lokální minima trendu se nacházejí v letech 24, 33, 43, 53, 62, 72 a 83.



Graf 54. Porovnání průběhu $Q_{m,um,LNAR}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1–50

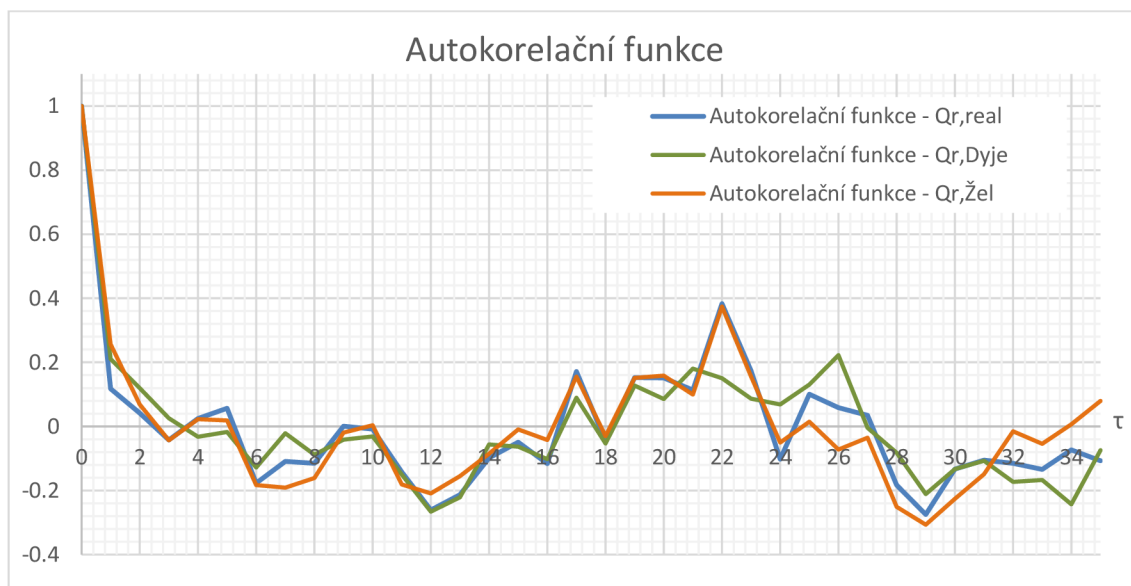


Graf 55. Porovnání průběhu $Q_{m,um,LNAR}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 50–100

5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

Všechny procesy a zkoumané veličiny v diplomové práci měly za cíl provést kompletní analýzu hydrologických řad průměrných ročních i měsíčních průtoků. Dále rozebrat statistické charakteristiky průtokových řad, stanovit zásobní objemy nádrže reálné průtokové řady i umělých průtokových řad až po výslednou dekompozici umělé průtokové řady. Kontrola přesnosti generátorů se prokáže shodou výstupů vypočtených z reálné průtokové řady, z vyhodnocení statistických charakteristik a kontrolou přesnosti získaných výsledků. Přesnost výsledků ovlivňuje kvalita a efektivnost generátoru náhodných čísel.

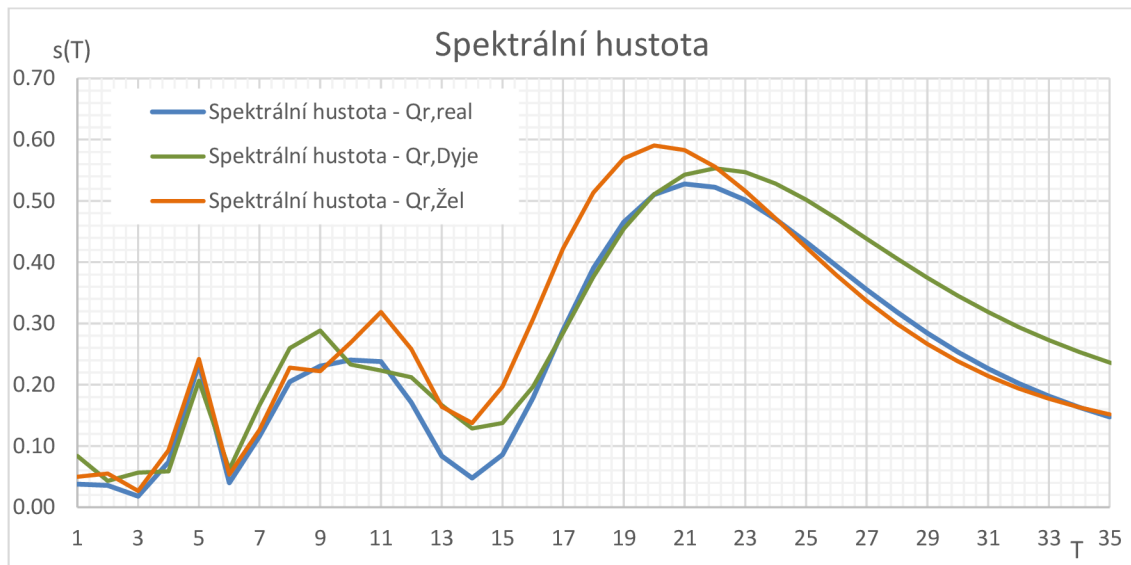
Praktická část se nejprve zaměřuje na rozebrání reálné průtokové řady, která je sečtená z měrných profilů ze stanice Podhradí nad Dyjí z toku Dyje a z hlásného profilu Vysočany na toku Želetavka. Pro reálnou průtokovou řadu naměřenou v Podhradí nad Dyjí, ve Vysočanech a zároveň pro celkovou reálnou průtokovou řadu, byla provedena dekompozice časových řad ročních průtoků. V grafu 56 jsou znázorněny průběhy autokorelačních funkcí pro $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$. Průběhy jsou hodně podobné. Lokálního maxima dosáhla reálná průtoková řada i řada Želetavky pro $\tau = 22$ a reálná řada Dyje pro $\tau = 26$.



Graf 56. Průběhy autokorelačních funkcí $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$

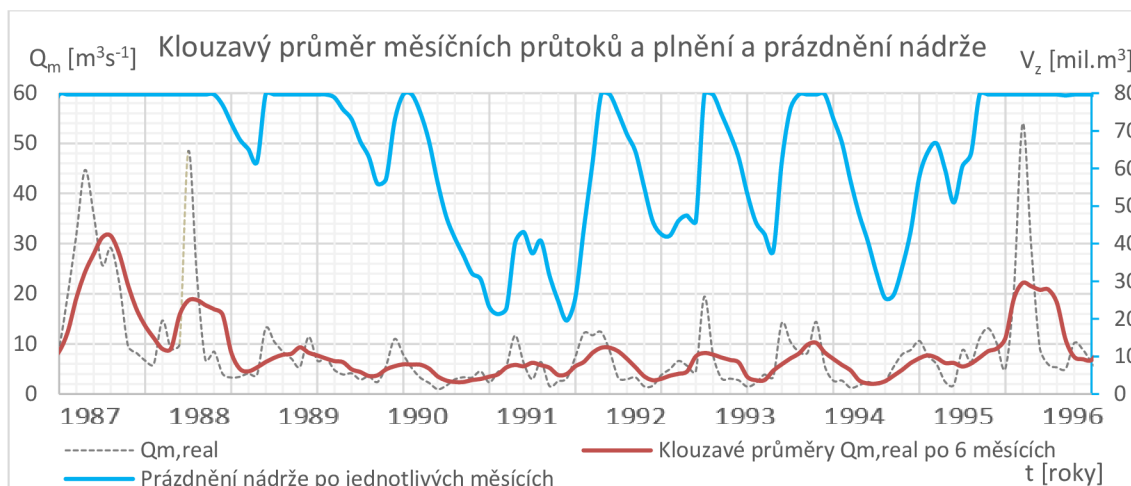
Správnost výpočtu Fourierovy transformace autokorelační funkce potvrzuje velmi shodný průběh spektrální hustoty $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$. Lokální maximum dosažené ve

spektrální hustotě reálné průtokové řady Dyje odpovídá $T = 22$. Reálná průtoková řada Želetavky svého maxima dosáhla v bodě $T = 20$. Skrytá perioda reálné průtokové řady se nachází přesně mezi skrytou periodou Dyje a Želetavky v hodnotě $T = 21$. Již zmíněné periodicity potvrzuje průběh a vývoj trendových složek jednotlivých průtokových řad. Nejlépe je tento fakt viděn u průběhu trendové složky reálné průtokové řady, kde je potvrzena periodicitu extrémů po 21 letech.



Graf 57. Průběh spektrální hustoty průtokových řad $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$

Dále byla diplomová práce zaměřená na provedení simulace zásobního objemu, resp. plnění a prázdnění nádrže Vranov. Simulace byla provedena pro průměrné roční průtoky reálné průtokové řady i pro detailnější měsíční průtoky reálné řady. Podrobné grafy 14 a 15 vykreslují reálnou průtokovou řadu s trendovými složkami a k němu odpovídající plnění/prázdnění nádrže. Z grafů je vidět, jak prázdnění nádrže odpovídá průběhu průměrných průtoků. Podrobněji je simulace zobrazena v kapitole 4.4.1, kde jsou měsíční průtoky vyhlazeny klouzavým průměrem po 6 měsících. Díky měsíčním průtokům není časová řada tolik vyhlazená a lze vidět podrobnější průběh průtoků a simulace nádrže. Graf 58 ukazuje, jak mezi sebou koresponduje plnění/prázdnění a vyhlazená průtoková řada. Období od roku 1989 prokazuje nejsušší etapu z celého měřeného období. Průměrné průtoky se pohybují okolo $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobní objem se v roce 1991 dotýkal i pouhých 20 000 000 m^3 . Toto suché období trvalo až do roku 1995.



Graf 58. Detail klouzavého průměru a plnění/prázdnění nádrže pro nejušší měřené období

V dalším textu v kapitole 4.5 byl proveden rozbor statistických charakteristik reálné průtokové řady a kontrola přesnosti výsledků vygenerovaných umělých průtokových řad. Kontrola výsledků je provedena na základě přesnosti ze statisticky zpracovaných výsledků. Tabulka 21 vyjadřuje průměrné hodnoty statistických charakteristik všech zkoumaných časových řad. Zaznamenány jsou v ní i odchylky reálné průtokové řady od umělé průtokové řady LNAR a LRM. Z tabulky je patrné, že minimálních rozdílů dosáhla umělá průtoková řada LNAR, která se nejvíce přibližuje k reálné průtokové řadě u disperse s odchylkou $12,483 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ a koeficientu asymetrie s odchylkou $0,049$. Druhá nejpřesnější umělá průtoková řada je z generátoru LRM. Nejshodnější charakteristiky s reálnou průtokovou řadou vykazuje směrodatná odchylka s odchylkou $0,485 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a koeficient variace s odchylkou $0,011$. Střední hodnota má druhý nejbližší výsledek k reálné řadě. Nejméně přesným generátorem je vyhodnocen generátor LTAR, jehož výsledky z vygenerované umělé průtokové řady se nejvíce liší od statistických charakteristik reálné řady.

Tabulka 21. Porovnání průměrných hodnot statistických charakteristik

Časové řady	$\mu(x)$ [m ³ s ⁻¹]	D(x) [m ⁶ s ⁻¹]	$\sigma(x)$ [m ³ s ⁻¹]	Cv(x) [-]	Ca(x) [-]	Ce(x) [-]
REAL	9,369	60,379	7,206	0,801	2,338	7,334
LNAR	9,036	47,896	6,114	0,682	2,387	11,193
LNMA	9,721	73,260	7,888	0,832	2,494	10,077
LRM	9,697	74,691	7,691	0,790	2,632	12,452
LTAR	8,486	39,443	5,434	0,642	2,418	11,158
LTMA	9,207	88,199	8,265	0,916	2,781	12,089
Odchylka LNAR od REAL	0,333	12,483	1,093	0,119	0,049	3,858
Odchylka LRM od REAL	0,883	14,312	0,485	0,011	0,294	5,118

V následném procentuálním porovnání je potvrzen nejvhodnější generátor LNAR, jehož odchylka od reálné průtokové řady činí 11,5 %. Je to nejmenší rozdíl ze všech zkoumaných generátorů. Druhým nejshodnějším je generátor LNMA s rozdílem 19,2 %. Poté generátor LTAR s 22,7 % a generátor LRM s 23,5 %. Největší odchylku má generátor LTMA s 38,9 %.

	rozdíl od reálné průtokové řady
Umělá průtoková řada LNAR	→ 11,5 %
Umělá průtoková řada LNMA	→ 19,2 %
Umělá průtoková řada LRM	→ 23,5 %
Umělá průtoková řada LTAR	→ 22,7 %
Umělá průtoková řada LTMA	→ 38,9 %

Kapitola 4.7 se zabývá porovnáním zásobních objemů nádrže V_z stanovených z reálné řady průměrných měsíčních průtoků a umělých průtokových řad měsíčních průtoků. Mezi sebou byly porovnány hodnoty zásobních objemů V_z v závislosti na nalepšených odtokách O_p . Výpočet uvažoval bez zavedení ztrát i se zavedením ztrát z vodní hladiny nádrže, resp. výparu. Výpar se pohyboval v rozmezí od 600 mm po 900 mm.

U reálné průtokové řady $Q_{m,real}$ z tabulky 15 byl nalepšený odtok O_p zvolen v intervalu $O_p \in \langle 4,0; 5,5 \rangle$ m³s⁻¹. Zásobní objemy bez ztrát $Q_{r,real,bz}$ se pohybují v rozmezí intervalu $V_z \in \langle 40\ 110\ 128\ \text{m}^3; 100\ 060\ 976\ \text{m}^3 \rangle$. Nárůst objemů pozorujeme u výparu 750 mm, kdy se zásobní objem zvedl oproti objemům bez ztrát o 7,20 %. Průměrně pro všechny nalepšené odtoky je nárůst objemu $5,5 \cdot 10^6$ m³. Výpar 900 mm učinil nárůst zásobního objemu o 8,57 %, tedy v průměru o $6,7 \cdot 10^6$ m³. Prokazatelné tedy je, že velikost výparu

ovlivňuje zásobní objem nádrže. Pro zásobní objem $79\,702\,520\text{ m}^3$, resp. hodnotu která se nejvíce blíží reálnému zásobnímu objemu, byl najit nejlepší odtok $O_p = 4,98\text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Pro výpočet zásobního objemu umělé průtokové řady $Q_{m,um,LNAR}$ z generátoru LNAR byl zvolen nejlepší odtok O_p v intervalu $O_p \in \langle 3,8; 5,0 \rangle\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Zásobní objemy bez ztrát nabývají hodnot v intervalu $V_z \in \langle 51\,135\,092\text{ m}^3; 104\,074\,392\text{ m}^3 \rangle$. U umělé řady LNAR je procentuální nárůst při výparu 750 mm i 900 mm menší než u reálné řady. Při výparu 750 mm se zásobní objem zvedl o 5,75 % a při výparu 900 mm o 6,93 %. Nejlepší odtok $O_p = 4,50\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ byl nalezen pro zásobní objem $79\,679\,264\text{ m}^3$. Nejlepší odtok reálné průtokové řady a umělé řady LNAR má rozdíl o $0,48\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Výsledky této řady jsou velmi blízké k reálné průtokové řadě.

Umělá průtoková řada měsíčních průtoků LNMA $Q_{m,um,LNMA}$ má hodnoty nejlepšího odtoku v intervalu $O_p \in \langle 3,0; 4,0 \rangle\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobní objemy bez ztrát v rozmezí daného intervalu $V_z \in \langle 48\,526\,128\text{ m}^3; 103\,053\,928\text{ m}^3 \rangle$. Oproti reálné průtokové řadě jsou nejlepší odtoky značně nižší. Nárůst objemu při výparu 750 mm je 7,25 % a při výparu 900 mm 8,54 %. Pro zásobní objem $79\,564\,504\text{ m}^3$ byl nalezen nejlepší odtok $O_p = 3,48\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Tato hodnota je o $1,5\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ menší než u reálné průtokové řady.

Podobné výsledky prokazuje umělá průtoková řada z generátoru LRM $Q_{m,um,LRM}$, kde je interval nejlepšího odtoku $O_p \in \langle 3,0; 3,8 \rangle\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a vypočtené zásobní objemy v intervalu $V_z \in \langle 56\,410\,872\text{ m}^3; 99\,261\,448\text{ m}^3 \rangle$. Procentuální nárůst zásobního objemu pro výpar 750 mm je 7,72 % a pro výpar 900 mm nárůst činí 9,20 %. Nejlepšímu odtoku $O_p = 3,34\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ odpovídá zásobní objem $V_z = 79\,717\,408\text{ m}^3$. Od nejlepšího odtoku reálné řady je nejlepší odtok umělé řady LRM o $4,65\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ menší.

Blíže k reálné průtokové řadě nejlepší odtoků $O_p \in \langle 3,5; 4,7 \rangle\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobních objemů bez ztrát $V_z \in \langle 45\,249\,152\text{ m}^3; 103\,401\,056\text{ m}^3 \rangle$ prokazuje umělá průtoková řada LTAR $Q_{m,um,LTAR}$. Její objemy při výparu 750 mm se v průměru zvednou o 7,32 % a u výparu 900 mm o 8,80 %. Zásobní objem $79\,837\,160\text{ m}^3$ byl nalezen pro nejlepší odtok $O_p = 4,28\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Ten se od reálné průtokové řady liší pouze o $0,7\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Tato řada prokazuje druhou nejlepší shodu s reálnou průtokovou řadou.

Poslední generovanou průtokovou řadou je umělá průtoková řada LTMA $Q_{m,um,LTMA}$. Pro tuto řadu je interval nejlepšího odtoků zvolen $O_p \in \langle 2,8; 3,7 \rangle\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobních objemů bez ztrát $V_z \in \langle 53\,870\,288\text{ m}^3; 101\,891\,464\text{ m}^3 \rangle$. Nárůst objemu pro výpar 750 mm je

8,76 % a pro výpar 900 mm 10,56 %. Nalepšený odtok $O_p = 3,26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ odpovídá zásobnímu objemu $79\,621\,752 \text{ m}^3$. Nalepšený odtok umělé průtokové řady je menší o $1,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ než u reálné průtokové řady. Tato řada vykazuje minimálně shodné výsledky s reálnou řadou.

V tabulce 22 jsou vyznačeny zásobní objemy pro jednotlivé průtokové řady při nalepšeném odtoku $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nejvíce se k reálné průtokové řadě přibližuje umělá průtoková řada LNAR, které se zásobní objem při daném nalepšeném odtoku zvýší o 40,8 %. Naopak nejméně shodný s reálnou průtokovou řadou je umělá průtoková řada LTMA, které by se zásobní objem V_z nádrže musel zvednout o 245,8 % pro nalepšený odtok reálné průtokové řady $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

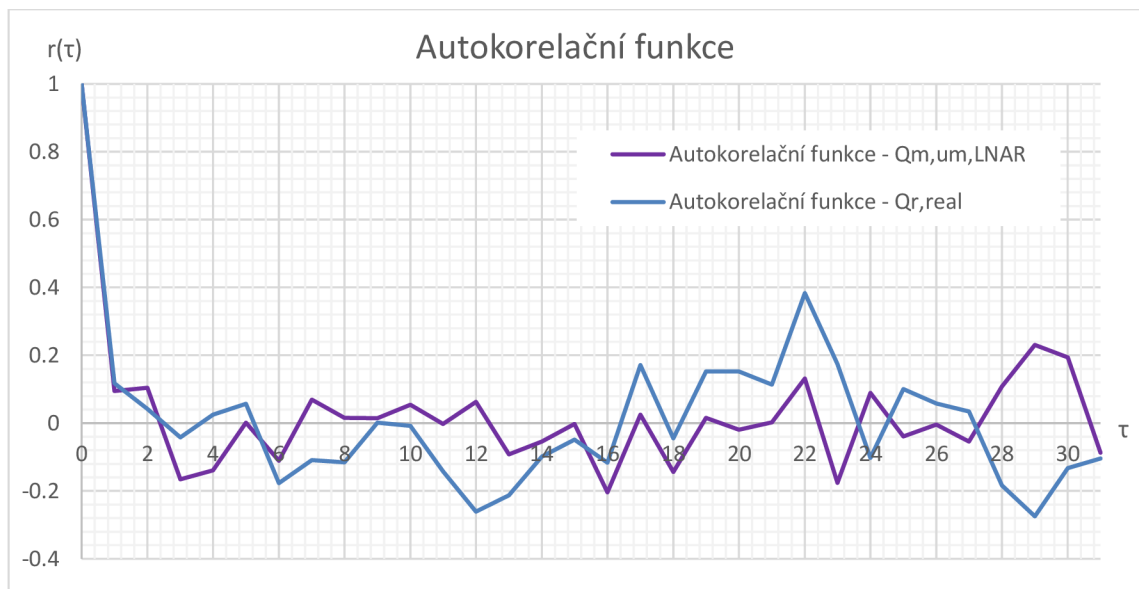
Tabulka 22. Zásobní objemy V_z pro nalepšený odtok $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ všech průtokových řad

průtokové řady	V_z pro $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	Nárůst V_z od $Q_{m,real}$
REAL $Q_{m,real}$	$79\,702\,520 \text{ m}^3$	
LNAR $Q_{m,um,LNAR}$	$112\,258\,623 \text{ m}^3$	40,8 %
LNMA $Q_{m,um,LNMA}$	$162\,589\,300 \text{ m}^3$	103,9 %
LRM $Q_{m,um,LRM}$	$174\,986\,659 \text{ m}^3$	119,5 %
LTAR $Q_{m,um,LTAR}$	$135\,711\,485 \text{ m}^3$	70,3 %
LTMA $Q_{m,um,LTMA}$	$275\,634\,485 \text{ m}^3$	245,8 %

Z výsledků prezentovaných v praktické aplikaci vyplývá následující. Dosažené výsledky z pohledu zásobního objemu se do jisté míry liší. V manipulačním řádu je nalepšený odtok pro 100 % zabezpečení udáván $O_p = 4,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobní objem $79\,668\,000 \text{ m}^3$. Pro co nejbližší zásobní objem k reálnému objemu tedy $V_z = 79\,702\,520 \text{ m}^3$ byl vyhledán nalepšený odtok $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Jak již bylo řečeno, do výpočtu nebyly zahrnuty odběry z nádrže a z toku nad nádrží. Proto není vhodné konfrontovat výsledky z vodohospodářského řešení zásobní funkce zpracované v manipulačním řádu a z diplomové práce. Nalepšené odtoky umělých průtokových řad jsou vždy nižší než nalepšený odtok stanovený z reálné průtokové řady pro zásobní objem $79,6 \text{ mil. m}^3$. Z porovnání generátorů umělých průtokových řad vyplývá, že nejmenší chyby výsledků zásobního objemu v závislosti na nalepšeném odtoku má generátor LNAR. Druhým nejhodnějším generátorem s výsledky reálné průtokové řady byl vyhodnocen generátor LTAR. Nejméně shodným byl zjištěn generátor LTMA, který prokazuje minimální shodu s reálnou průtokovou řadou.

Poslední kapitola 4.8 se zabývá hydrologickým testem generátoru LNAR, který byl vyhodnocený jako nejpřesnější generátor s porovnáním s reálnou průtokovou řadou. Hledaly se hydrologické podobnosti s reálnou průtokovou řadou. Aby bylo možné průtokové řady porovnat, byl vybrán jako spolehlivý test průběh autokorelační funkce. Stanovily se i trendové složky časové umělé průtokové řady LNAR pro hledání skrytých period v řadě. Daná analýza pracovala s ročními průtoky a rozebráno bylo prvních 100 let z umělé průtokové řady.

Z grafu 59 jsou vidět průběhy autokorelační funkce reálné průtokové řady a umělé průtokové řady LNAR. Průběh autokorelační funkce umělé průtokové řady se moc neliší od reálné průtokové řady. Například od $\tau = 16$ do $\tau = 21$ se hodnoty umělé průtokové řady blíží více k nule, ale průběhem téměř kopíruje reálnou průtokovou řadu. Umělá průtoková řada LNAR dosáhla extrému pro $\tau = 29$. Téhož extrému dosáhla i reálná průtoková řada ovšem záporného. Další extrém pozorujeme u $\tau = 22$, který se projevil jako maximální extrém u reálné průtokové řady. Můžeme říci, že u autokorelační funkce umělé průtokové řady LNAR se podobnost s reálnou řadou projevila.



Graf 59. Průběh autokorelační funkce umělé průtokové řady LNAR a reálné průtokové řady

Pro potvrzení výpočtu skrytých period z autokorelační funkce byl sestaven graf 54 a graf 55 pro umělou průtokovou řadu LNAR. V grafu jsou zobrazeny průběhy trendových složek 2./3. řádu délky 9 a délky 11. Zároveň je v grafu poukázáno na vyskytující se extrémy v časové řadě, které se projevují po 12 a 22 letech. Výskyty těchto skrytých period prokázala i autokorelační funkce. Podobný graf 14 a graf 15 je sestaven i

v kapitole 4.3.6 a poukazuje na výskyt skrytých period reálné průtokové řady. Z grafu 14 a 15 vyplývá, že nejsilnější periody se projevily po 22 letech a zhruba po 10 letech.

Z výsledků vyčtených z grafů autokorelační funkce a trendových složek, zároveň z výpočtu zásobního objemu reálné průtokové řady $Q_{m,real}$ a umělé průtokové řady LNAR $Q_{m,um,LNAR}$ můžeme říci, že se projevila vzájemná podobnost. Výsledky zásobního objemu vyšly nejpodobněji a s nejmenšími rozdíly od reálné průtokové řady ze všech zkoumaných časových řad. Nejsilnější skryté periody se u obou zkoumaných časových řad projevily přibližně po 20 letech. Druhá nejsilnější perioda se prokázala okolo 10 let. Umělá průtoková řada vygenerovaná z generátoru LNAR je vyhodnocena jako nejvhodnější podklad rozšířených hydrologických podkladů pro nádrž Vranov.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce si kladla za cíl provést kompletní analýzu časových průtokových řad a simulační model chování nádrže Vranov. Vytvořit rozšířené hydrologické podklady pomocí generátorů umělých průtokových řad a vypracovat komplexní vodohospodářské řešení bez uvažování ztrát i se zavedením ztrát z vodní hladiny. Jako vstupní data sloužila reálná průtoková řada sečtená z reálných řad měřených z měrné stanice Podhradí nad Dyjí na toku Dyje a reálná řada z měrné stanice Vysočany na toku Želetavka. Z daných dvou řad se vytvořila reálná průtoková řada pro nádrž Vranov, která sloužila jako vstup pro generování umělých průtokových řad o délce 10 000 let. Pro jednotlivé řady byly vyhodnoceny statistické charakteristiky a prokázán vliv generovaných řad ve výpočtu vodohospodářského řešení zásobního objemu. Nakonec se provedla analýza a dekompozice nejhodnější umělé průtokové řady s reálnou průtokovou řadou.

Z důvodu klimatických změn průtoků vodních stavů byla nejprve rozebrána reálná průtoková řada, ve které v posledních letech také dochází ke změnám. Vhodnými metodami pro rozebrání průtokové řady se projevila autokorelační funkce, spektrální hustota, dekompozice časové řady, simulace plnění/prázdění nádrže a statistické charakteristiky. Z analýzy byla zjištěna zhruba 10-ti letá perioda střídání vodných a málo vodných období. V současnosti začaly průtoky klesat k minimálním hodnotám. Celkový lineární trend má lehce rostoucí průběh. Do budoucna však lze předpokládat, že křivka nabere klesající směr a to z důvodu velmi suchého období přetrvávající od roku 2013. Nelze tedy prokazatelně říci, zda na suchu má vliv klimatická změna, lidská činnost nebo opět nastávající velmi suché období. To bylo naposledy pozorováno v letech 1987–1997, kdy se průměrné průtoky pohybovaly okolo $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Pro lepší popis změn v hydrologických řadách je důležité pokračovat v analyzování časových řad, jelikož to pomůže k lepšímu využívání akumulované vody a k šetrnějšímu hospodaření s povrchovou vodou.

Další část práce měla za cíl rozebrat statistické charakteristiky, vytvořit čáry pravděpodobnosti překročení reálné průtokové řady a zároveň rozšířených hydrologických pokladů. Danými hydrologickými podklady se rozumí vygenerované umělé průtokové řady z pěti různých generátorů. Zvolenými generátory jsou generátor LNAR, LNMA, LRM, LTAR a LTMA. Z vyhodnocení statistických charakteristik reálné průtokové řady bylo zjištěno, že největší průtoky můžeme očekávat v březnu. Při těchto maximálních průtocích bylo dosaženo maxima u střední hodnoty, disperse i směrodatné

odchylky. Naopak za nejstálejší měsíce můžeme považovat září, říjen a listopad, jelikož dosáhly nejnižších hodnot disperze, resp. nejmenšího rozptylu od průměrných hodnot. Při kontrole výsledků ze statistických charakteristik a čar pravděpodobnosti překročení vyšla s nejmenšími chybami umělá průtoková řada LNAR a LRM. Umělá průtoková řada LNAR se nejvíce podobá svými výsledky reálné průtokové řadě u disperze, koeficientu asymetrie a má nejmenší procentuální rozdíl statistických charakteristik od reálné průtokové řady. Umělá řada LRM je nejshodnější s reálnou průtokovou řadou u výpočtu směrodatné odchylky, koeficientu variace a druhou nejbližší je střední hodnota.

Následující část se věnovala vodohospodářskému řešení nádrže Vranov. Výpočet byl proveden pro 100 % zabezpečení a nebylo zde uvažováno s odběry z nádrže a toku nad nádrží. Proto nelze výsledky konfrontovat s manipulačním řádem, který udává hodnotu nalepšeného odtoku $O_p = 4,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a zásobní objem $V_z = 79\,668\,000 \text{ m}^3$. Je ovšem zřejmé, že velikost výparu ovlivňuje zásobní objem nádrže. Kvůli již zmiňované klimatické změně a narůstání průměrné teploty, by se výpar z vodní hladiny mohl dostat až na 900 mm za rok a zásobní objemy by byly nedostatečné. U reálné průtokové řady vyšel výpočet zásobního objemu při současném výparu 750 mm $V_z = 79\,702\,520 \text{ m}^3$ pro nalepšený odtok $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nalepšený odtok se oproti nalepšenému odtoku z manipulačního řádu zvedl o $0,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Při zvýšení výparu na 900 mm a stejném nalepšeném odtoku by už zásobní objem $V_z = 81\,150\,864 \text{ m}^3$ byl nedostačující a bylo by nutné přezkoumání velikosti zásobního objemu.

Při vyšetření zásobního objemu u jednotlivých umělých průtokových řad bylo zjištěno, že nejlepšími výsledky dosáhl generátor LNAR a druhým nejshodnějším generátorem s reálnou průtokovou řadou vyšel generátor LTAR. Nalepšený odtok O_p pro umělou průtokovou řadu LNAR $O_p = 4,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ byl nalezen pro zásobní objem $V_z = 79\,679\,264 \text{ m}^3$. Rozdíl od reálné průtokové řady činí $0,48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nalepšený odtok umělé průtokové řady je shodnější s manipulačním řádem více než reálná průtoková řada. Značně viditelné jsou rozdíly nalepšených odtoků reálné řady a umělých průtokových řad. Příčinou rozdílů může být množství vodných období v umělé průtokové řadě, chyby a odchylky s jakými generátory pracují nebo nedostatečně dlouhá vstupní řada.

Z uvedených výsledků se prokázala jako nejvhodnějším rozšířeným podkladem pro nádrž Vranov umělá průtoková řada vygenerovaná z generátoru LNAR. Provedl se tedy test generátoru s porovnáním s reálnou průtokovou řadou. Test byl proveden dekompozicí časové řady a vyšetření průběhu autokorelační funkce. Můžeme tedy říci, že průběh

autokorelační funkce umělé průtokové řady LNAR hodně kopíruje průběh reálné průtokové řady. U reálné průtokové řady se skrytá perioda objevila po 21 letech. Podobnost mezi jednotlivými řadami dokazuje průběh umělé průtokové řady LNAR, kdy trendové složky dokázaly průběh skrytých period zhruba po 20 letech.

Již zmíněný vývoj klimatu a změny v průtokových řadách jsou v dnešní době často diskutovány. Je důležité, aby se společnost během procesu adaptovala na případné změny a nástup častějších klimatických extrémů. Bylo by vhodné provést obdobné analýzy i pro jiné nádrže. Prozkoumat, zda zásobní objemy jsou dostatečné a dosažené poznatky využít v praxi, především pro navazující výpočty vodohospodářských řešení a následném řízení vodárenských nádrží.

BIBLIOGRAFIE

- [1] *November global temperature highest on record. NOAA Climate Portal* [online]. 2013 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.climate.gov/news-features/featured-images/november-global-temperature-highest-record>
- [2] *Příčiny změny klimatu: Opatření v oblasti klimatu* [online]. Brussels, 2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_cs
- [3] *Ochrana klimatu a energetiky: Adaptace na změnu klimatu* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2015 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/adaptace_na_zmenu_klimatu
- [4] *Co je sucho* [online]. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, 2005 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.intersucho.cz/cz/o-suchu/co-je-sucho/>
- [5] *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR* [online]. Ministerstvo životního prostředí, 2015 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz>
- [6] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha, b.r. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/o-nas/zakladni-dokumenty>
- [7] DATEL, Josef. *Vodohospodářské technicko-ekonomické odborné informace. Vodohospodářské technicko-ekonomické odborné informace*. 53. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, b.r., **53**. ISSN 0322-8916.
- [8] *Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a průvodohospodářském plánování* [online]. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., b.r. [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <http://rscn.vuv.cz/>
- [9] *Optimalizace vodohospodářského řešení zásobní funkce vodohospodářské soustavy Povodí Odry* [online]. Ostrava: Povodí Odry, státní podnik, 2019 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <https://www.pod.cz/>
- [10] RŮŽA, P. *Řešení zásobního objemu nádrže v umělých hydrologických řadách*. VUT FAST v Brně. Brno, 1988.
- [11] PILAŘ, L. *Užití generátoru LN a LT pro generování umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků*. VUT FAST v Brně. Brno, 1988.

- [12] MARTON, DANIEL. *Vliv nejistot členů reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků při generování umělých průtokových řad: In Sborník konference mladých hydrologou*. S. 1-12. Bratislava, 2009. ISBN 978-80-88907-70- 1.
- [13] STARÝ, Miloš. *HYDROLOGIE: MODUL 01*. Brno: VUT v Brně - Fakulta stavební, 2005.
- [14] STARÝ, Miloš. *NÁDRŽE A VODOHOSPODÁŘSKÉ SOUSTAVY: MODUL 01*. Brno: VUT v Brně - Fakulta stavební, 2006.
- [15] CIPRA, Tomáš. *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*. SNTL - Nakladatelství technické literatury. Praha, 1986.
- [16] BOX, G. *Time series analysis, forecasting and control*. San Francisco, 1970.
- [17] HIRSCH, R. *Synthetic Hydrology and Watert Supply Reliabiliti, Water Resources Research Vol. 15, No.6*. American Geophysical Union, 1979. ISSN 0043-1397.
- [18] MARTON, Daniel. *Vliv nejistot při stanovení členů reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků na vypočtené hodnoty zásobního objemu nádrže*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
- [19] MARTON, D a M STARÝ. *Krycí list programu SYNTHE: SYNTHE (Generátory umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [20] VÍTKOVÁ, Lucie. *Vodohospodářské řešení vybrané vodní nádrže*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT.
- [21] MARTON, D., M. STARÝ a P. MENŠÍK. *UNCERESERVOIR; UNCERESERVOIR - Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže.:*
<http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL:
<http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software). b.r.
- [22] *Přehradní nádrž Vranov: https://www.seznam.cz/: https://mapy.cz* [online]. b.r. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.7884727&y=48.9369756&z=11&q=vranov>
- [23] *MANIPULAČNÍ ŘÁD pro VD Vranov na řece Dyji v km 175,405*. Brno: Povodí Moravy, s.p, 2011.
- [24] *Plán oblasti povodí Dyje* [online]. Brno: Český hydrometeorologický ústav, 2010 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/pop/2009/Dyje/end/a-popis/a-1.html>

- [25] *Vranovská přehrada - historie: Elektrárna Vranov nad Dyjí* [online]. Znojmo: Vranov Agency, 2018 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <http://elektrarna-vranov.cz/vranovska-prehrada-historie>
- [26] *Evidenční list hlásného profilu* [online]. Brno: Český hydrometeorologický ústav, 2010 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=2505251
- [27] *Studie protipovodňových opatření na území Jihomoravského kraje 3A06105: T.1.2: M - denní průtoky*. Brno: Český hydrometeorologický ústav, 2010.
- [28] *Evidenční list hlásného profilu* [online]. Brno: Český hydrometeorologický ústav, 2010 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=2505252

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Průběh průtokové řady Q_t [13]	4
Obrázek 2. Trendová složka $T_{r,i}$ [13]	8
Obrázek 3. Průběh autokorelační funkce [13]	10
Obrázek 4. Schéma pro vytvoření vstupů z průtokové řady a výpočet koeficientu prvního řádu [13].....	10
Obrázek 5. Průběh spektrální hustoty [13].....	11
Obrázek 6. Střední hodnota je x-ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti [13]	19
Obrázek 7. Koeficient asymetrie odpovídá o naklonění grafu hustoty pravděpodobnosti [13].....	20
Obrázek 8. Vodní nádrž Vranov a znázornění měrných profilů Podhradí nad Dyjí a Vysočany [22].....	27
Obrázek 9. Vodohospodářské schéma nádrže Vranov – funkční prostory	29

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Váhy klouzavých průměrů [15]	9
Tabulka 2. Nutný počet realizací pro odhad statistické charakteristiky s chybou $\pm 10\%$	21
Tabulka 3. Plnění a prázdnění nádrže [14]	23
Tabulka 4. Výpočet Úlohy č. 1 $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100\%$	24
Tabulka 5. Evidenční list hlásného profilu č. 358 [26]	30
Tabulka 6. M-denní průtoky měrné stanice Podhradí pod Dyjí [27]	30
Tabulka 7. Evidenční list hlásného profilu č. 360 [28]	31
Tabulka 8. M-denní průtoky měrné stanice Vysočany	31
Tabulka 9. Statistické charakteristiky reálné průtokové řady	48
Tabulka 10. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LNAR.....	53
Tabulka 11. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LNMA	56
Tabulka 12. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LRM	59
Tabulka 13. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady měsíčních průtoků z generátoru LTAR	62
Tabulka 14. Statistické charakteristiky umělé průtokové řady z generátoru LTMA.....	65
Tabulka 15. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu reálné průtokové řady	75
Tabulka 16. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LNMA.....	77
Tabulka 17. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LRM	78
Tabulka 18. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LTAR	79
Tabulka 19. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LTMA	80
Tabulka 20. Porovnání zásobních objemů bez ztrát a při výparech 600 mm, 750 mm a 900 mm umělých průtokových řad LNAR a LTAR s reálnou průtokovou řadou.....	82
Tabulka 21. Porovnání průměrných hodnot statistických charakteristik.....	90
Tabulka 22. Zásobní objemy V_z pro nalepšený odtok $O_p = 4,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ všech průtokových řad	92

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1. Průběh průměrných průtoků reálných průtokových řad v čase t od roku 1957 do roku 1985	32
Graf 2. Průběh průměrných průtoků reálných průtokových řad v čase t od roku 1986 do roku 2017	32
Graf 3. Průběh lineární spojnice trendu průměrných ročních průtoků reálné průtokové řady	32
Graf 4. Autokorelační funkce reálné průtokové řady $Q_{r,real}$	33
Graf 5. Autokorelační funkce reálných průtokových řad Dyje a Želetavky	34
Graf 6. Spektrální hustoty reálné průtokové řady $Q_{r,real}$	34
Graf 7. Spektrální hustoty reálných průtokových řad Dyje a Želetavky	35
Graf 8. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1957–1987 ...	36
Graf 9. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1987–2017...	36
Graf 10. Porovnání průběhu $Q_{r,real}$ a vyhlazené řady 4./5. řádu	37
Graf 11. Porovnání průběhu $Q_{r,Dyje}$ a vyhlazené řady 2./3. řádu	38
Graf 12. Porovnání průběhu $Q_{r,žel}$ a vyhlazené řady 2./3. řádu	39
Graf 13. Porovnání trendových složek s klouzavým průměrem po 5 letech $Q_{r,real}$	40
Graf 14. Průběh průměrných ročních průtoků $Q_{r,real}$ s trendovými složkami délky 9 a délky 11 a znázornění simulace zásobní funkce nádrže v letech 1957–1987	42
Graf 15. Průběh průměrných ročních průtoků $Q_{r,real}$ s trendovými složkami délky 9 a délky 11 a znázornění simulace zásobní funkce nádrže v letech 1987–2017	42
Graf 16. Měsíční průtoky reálné průtokové řady s vyznačeným aritmetickým průměrem	43
Graf 17. Klouzavé průměry měsíčních průtoků a znázornění simulace zásobní funkce nádrže Vranov v letech 1957–1987	45
Graf 18. Klouzavé průměry měsíčních průtoků a znázornění simulace zásobní funkce nádrže Vranov v letech 1987–2017	45
Graf 19. Detail klouzavého průměru a plnění/prázdnění nádrže pro nejušší měřené období.....	47
Graf 20. Střední hodnota měsíčních průtoků reálné průtokové řady	49
Graf 21. Disperze měsíčních průtoků reálné průtokové řady.....	50
Graf 22. Směrodatná odchylka měsíčních průtoků reálné průtokové řady	50
Graf 23. Koeficient variace měsíčních průtoků reálné průtokové řady.....	51
Graf 24. Koeficient asymetrie měsíčních průtoků reálné průtokové řady	51

Graf 25. Koeficient excese měsíčních průtoků reálné průtokové řady	52
Graf 26. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen	54
Graf 27. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	55
Graf 28. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen	57
Graf 29. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LNMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	58
Graf 30. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LRM}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen	60
Graf 31. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LRM}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	61
Graf 32. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	63
Graf 33. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTAR}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	64
Graf 34. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce leden až červen	66
Graf 35. Čára pravděpodobnosti překročení průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,um,LTMA}$ a $Q_{m,real}$ pro měsíce červenec až prosinec	67
Graf 36. Porovnání průměrných středních hodnot a disperze umělých průtokových řad od reálné průtokové řady	68
Graf 37. Porovnání průměrných směrodatných odchylek a koeficientu variace umělých průtokových řad od reálné průtokové řady.....	68
Graf 38. Porovnání průměrných koeficientu asymetrie a koeficientů excese umělých průtokových řad od reálné průtokové řady.....	69
Graf 39. Porovnání střední hodnoty umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou	71
Graf 40. Porovnání disperze umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou.....	71
Graf 41. Porovnání směrodatné odchylky umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou	72
Graf 42. Porovnání koeficientu variace umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou	72

Graf 43. Porovnání koeficientu asymetrie umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou	73
Graf 44. Porovnání koeficientu excese umělých průtokových řad LNAR a LRM s reálnou průtokovou řadou	73
Graf 45. Závislost nalepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu reálné průtokové řady	76
Graf 46. Nalepšený odtok O_p v závislosti zásobního objemu V_z při narůstajícím výparu umělé průtokové řady LNAR.....	76
Graf 47. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LNAR.....	77
Graf 48. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LNMA.....	78
Graf 49. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LRM	79
Graf 50. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LTAR	80
Graf 51. Závislost nelepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z při nárůstu výparu umělé průtokové řady LTMA	81
Graf 52. Porovnání závislosti nalepšeného odtoku O_p na zásobním objemu V_z umělých průtokových řad LNAR a LTAR s reálnou průtokovou řadou	83
Graf 53. Autokorelační funkce umělé průtokové řady $Q_{m,um,LNAR}$	85
Graf 54. Porovnání průběhu $Q_{m,um,LNAR}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 1–50....	86
Graf 55. Porovnání průběhu $Q_{m,um,LNAR}$ a klouzavých průměrů 2./3. řádu roku 50–100	86
Graf 56. Průběhy autokorelačních funkcí $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$	87
Graf 57. Průběh spektrální hustoty průtokových řad $Q_{r,real}$, $Q_{r,Dyje}$ a $Q_{r,žel}$	88
Graf 58. Detail klouzavého průměru a plnění/prázdňení nádrže pro nejsušší měřené období.....	89
Graf 59. Průběh autokorelační funkce umělé průtokové řady LNAR a reálné průtokové řady	93