



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

PŘEDPOVĚDNÍ MODEL PRŮTOKŮ VODY V OVLIVNĚNÉM MĚRNÉM PROFILU

FORECASTING MODEL FOR INFLUENCED WATER MEASURED PROFILE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Krepčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ KOZEL, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiří Krepčík
Název	Předpovědní model průtoků vody v ovlivněném měrném profilu
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	05. 06. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- Starý, M.: Nádrže a vodohospodářské soustavy, skriptum. FAST VUT Brno, 2006.
- Starý, M.: Hydrologie, skriptum, FAST VUT Brno, 2005.
- Starý, M.: Nádrže a vodohospodářské soustavy, met. návody do cvičení 1. vyd. Brno: VUT, 1987
- Starý, M.: Nádrže a vodohospodářské soustavy, 1. vydání Brno: VUT, 1986 skriptum.
- Nacházel K., Starý M., Zezulák J.: Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství, kniha, 320 stran, Academia, 2004, ISBN 80-200-0229-4.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student sestaví model pro předpovídání průměrných měsíčních průtoků vody v měrném profilu, který bude upřesněn vedoucím práce. V druhém kroku student provede vyhodnocení výsledků předpovědního modelu pomocí četností v jednotlivých intervalech.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA

Abstrakt

Stochastické předpovědní modely byly sestaveny pro potřeby stochastického řízení zásobní funkce nádrže. Tyto modely lépe vystihují náhodné procesy, mezi které můžeme zařadit průtok v měrném profilu. V práci je popsáno sestavení a vyhodnocení předpovědního modelu průtoků, který spadá do kategorie stochastických modelů. Jedná se o modifikovaný zonální model, který je aplikován na ovlivněný měrný profil. Model byl kalibrován a validován na zkušebním měrném profilu. Měrný profil obsahuje 85 let historických měření. Z modelu bylo získáno velké množství dat. Získaná data jsou vyhodnocována naprogramovaným programem a závěrem práce je zhodnocení úspěšnosti a kvality modelu.

Klíčová slova

Ovlivněný měrný profil, modifikovaný zonální model, stochastická předpověď, vodní nádrž, řízení nádrže.

Abstract

Stochastic prediction models were compiled for the needs of stochastic control of the storage function of the tank. These models better capture random processes, among which we can include the flow in the specific profile. The work describes the compilation and evaluation of the flow prediction model, which falls into the category of stochastic models. It is a modified zonal model, which is applied to the affected specific profile. The model was calibrated and validated on a test measurement profile. The specific profile contains 85 years of historical measurements. A large amount of data was obtained from the model. The obtained data are evaluated by a programmed program and the conclusion of the work is the evaluation of the success and quality of the model.

Keywords

Influenced specific profile, modified zonal model, stochastic prediction, water reservoir, reservoir control.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jiří Krepčík *Předpovědní model průtoků vody v ovlivněném měrném profilu.*

Brno, 2020. 34 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Předpovědní model průtoků vody v ovlivněném měrném profilu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jiří Krepčík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Předpovědní model průtoků vody v ovlivněném měrném profilu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jiří Krepčík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem práce bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Kozlovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky při programování předpovědního modelu a psaní bakalářské práce. Dále chci poděkovat rodičům, a především mé rodině za trpělivost, podporu a porozumění, které mi věnovali po celou dobu studia. Nesmím zapomenout poděkovat i kolegovi Vladimíru Guhlovi za obrovskou trpělivost a podporu při mém studiu.

OBSAH

1	ÚVOD	2
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	3
3	METODY	4
3.1	Boks-Koksova transformace	4
3.2	Transformace na hladinu Z	5
3.3	Matematické pojmy:.....	5
4	PŘEDPOVĚDNÍ MODELY	7
4.1	Deterministický	7
4.1.1	Zonální model.....	7
4.2	Stochastický.....	8
4.2.1	Modifikovaný zonální předpovědní model	9
5	APLIKACE	11
5.1	Zájmová oblast.....	11
5.1.1	Měrný profil - Letovice.....	11
5.1.2	Povodí Křetínky	12
5.1.3	Povodí Svitavy	14
5.2	Kalibrace modelu	16
5.3	Validace.....	16
5.3.1	Histogramy	17
5.4	Výsledky aplikace.....	18
6	ZÁVĚR	22
7	POUŽITÁ LITERATURA	23
	SEZNAM TABULEK	24
	SEZNAM OBRÁZKŮ	25
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	26
	SUMMARY	27

1 ÚVOD

Vzhledem k čím dál častěji skloňovanému nedostatku vody ve vodních tocích a podzemních vodách, které se již projevilo v letech 2017, 2018 a 2019, je kladen větší důraz na hospodaření s vodou v krajině. Nedostatek vody je dán intenzivnějšími, ale méně častými srážkami. Z takovýchto srážek se minimální množství vody zasakuje do podzemních vod a většina vody odtéká do toků a pryč z území. Proto je snaha zadržovat větší množství vody, ale budování dalších retenčních nádrží je náročné, proto se klade větší důraz na řízení zásobních funkcí stávajících nádrží. Jedním z prostředků na zlepšení hospodaření s vodními zdroji jsou předpovědní modely dešťových srážek a průtoků ve vodních tocích. Tyto modely jsou využívány k efektivnějšímu řízení odtoků a odběrů z vodních nádrží a vodních toků. Pro předpovídání průtoků využíváme dva druhy předpovědních modelů, deterministický a stochastický. Ve své práci jsem využil stochastický modifikovaný zonální model. Předpovědní model i vyhodnocovací program jsou napsány ve strojovém jazyce Basic a naprogramovány v prostředí programu Matlab (The Mathworks, 1984-2013). Pro kalibraci byla použita průtoková řada z měrného profilu Letovice, který se nachází na řece Svitavě. Získaná data z modelu byla z důvodu velkého množství dat vyhodnocena vytvořeným programem. Program zatřídil data do intervalů dle četnosti a roztříděná data byla zapsána do tabulek a jsou popsána v této práci.

Cílem bakalářské práce je aplikovat zonální předpovědní model s různými vstupními konstantami, vyhodnotit výstupní data a nalézt nejlepší kalibraci.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V současné době známe dva způsoby předpovídání, deterministické předpovědi jsou jednodušší ale jsou zatíženy větší chybou. U stochastických předpovědí nelze určit přesnou hodnotu, ale pouze se snažíme určit s jakou pravděpodobností se hodnota vyskytne v daném intervalu. Pomocí historické průtokové řady lze předpovědní modely dobře kalibrovat a tak získávat přesnější předpovědi.

U nás se aktuálně pro řízení nádrží nevyužívají stochastické předpovědi, ale v praxi jsou využívány především dispečerské grafy, které jsou součástí každého manipulačního řádu. Dispečerský graf využívá závislosti potřebných objemů vody v nádrži na celkovém odtoku vody v průběhu roku. V historii se u nás problematice DG věnovalo mnoho autorů. K nejvýznamnějším autorům věnujícím se problematice dispečerských grafů patřili Votruba a Broža. Konstrukce DG se ale často provádí s využitím umělých průtokových řad.

3 METODY

Zadaná data byla roztržiděna do mēsiců, ve kterých se vyskytovala. Každý mēsic má jiné pravděpodobnostní rozdělení a jinou autokorelační funkci. Z výše uvedených důvodů bylo generování průtokových řad problematické. Proto byla data transformována pomocí Cox-Boxovi transformace na hladinu Y a následně převedena na hladinu Z (normované normální rozdělení), kde proběhla jejich analýza a následné generování umělé průtokové řady. Vygenerovaná řada se pak vrací inverzní transformací na původní rozdělení.

3.1 BOKS-KOKSOVA TRANSFORMACE

Prvním krokem bylo odstranění asymetrie dat - transformace na hladinu Y . Proto bylo přistoupeno k odstranění asymetrie Cox-Boxovou rovnicí (Box, Cox, 1964)

$$Y_{i,j} = \frac{(Q_{i,j})^{r_j} - 1}{r_j}, \quad (3.1)$$

kde $Y_{i,j}$ je transformovaný průměrný měsíční průtok na rozdělení bez asymetrie, $Q_{i,j}$ je průměrný měsíční průtok, který je transformován, r_j je koeficient transformace pro vybraný mēsic, j je pořadí mēsíce (1-12, leden je 1 a prosinec je 12) a i je index průtoku.

Problémem při použití Cox-Boxovi rovnice se ukázal parametr r , který lze jen obtížně dopočítat, a proto bylo přikročeno k jeho stanovení numerickou optimalizací pomocí mřížkové metody. Kritériem optimalizace byla odchylka koeficientu asymetrie od nuly, která byla minimalizována. Optimalizace se zastavila, pokud hodnota asymetrie byla v rozmezí hodnot -0.001 až +0.001 (předpoklad normálního rozdělení). (Kozel, 2017)

3.2 TRANSFORMACE NA HLADINU Z

Po transformování dat Cox-Boxovi rovnicí bylo nutné transformovat členy průtokové řady z hladiny Y na hladinu Z , kde dosahují normovaného normálního rozdělení. Transformace proběhla za použití běžných transformačních vztahů

$$Z_{i-1j} = \frac{Y_{i-1j} - x_{j-1}}{s_{j-1}}, \quad (3.2)$$

$$Y_{i,j} = x_j + s_j \cdot Z_{i,j}, \quad (3.3)$$

kde $Y_{i,j}$ je transformovaný průměrný měsíční průtok na rozdělení bez asymetrie, $Z_{i,j}$ je předpovězený průměrný měsíční průtok, který je transformován, x_j je průměr hodnot v předpovězeném měsíci, s_j je směrodatná odchylka předpovídaného měsíce, j je pořadí měsíce (1-12, leden je 1, prosinec je 12) a i je číslo předpovědi (1 - 1000). (Kozel, 2017)

3.3 MATEMATICKÉ POJMY:

Aritmetický průměr = Aritmetický průměr je součtem všech hodnot vydělených jejich počtem. Všechny hodnoty ve výpočtu mají stejnou důležitost – váhu.

Součet = Součet je výsledkem matematické operace sčítání, neboli kombinace dvou a více čísel do jednoho čísla.

Histogram = Histogram je sloupcový graf používaný ve statistice. Zobrazuje výskyt hodnot spojité veličiny pomocí různě vysokých sloupců, tyto sloupce ovšem musejí mít stejnou šířku odpovídající intervalu hodnot. Výška každého sloupce vyjadřuje hustotu výskytu hodnot, plocha sloupce pak odpovídá četnosti daných hodnot v intervalu.

Transformace = Transformace mění uspořádání dat.

Asymetrie = Asymetrie neboli nesouměrnost je opak symetrie tedy souměrnosti. Znamená rozložení kontrastních kompozičních prvků tak, aby jejich celková skladba působila nevyváženě.

Kalibrace = Kalibrace je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím systémem nebo měřicím přístrojem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony (standards).

Validace = Validace je kontrola, ověření výstupních nebo vstupních údajů.

Směrodatná odchylka = Směrodatná odchylka je mírou statistické variability. Směrodatná odchylka, podobně jako rozptyl, určuje jako moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Směrodatná odchylka je rovna odmocnině z rozptylu.

Normované normální rozdělení = Normální rozdělení neboli Gaussovo rozdělení (podle Carla Friedricha Gausse) je jedno z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny. (Slovo „normální“ zde není použito v nejběžnějším smyslu „obyčejné, běžné“, ale znamená „řídící se zákonem, předpisem nebo modelem“.) Normované normální rozdělení je označeno $N(0,1)$. [10]

4 PŘEDPOVĚDNÍ MODELY

Bylo použito matematických modelů, které na základě znalosti historické řady generují rozšíření řady o předpovídanou část. Matematické modely lze třídit z různých hledisek. Za hlavní lze považovat odlišení deterministických model od stochastických model.

4.1 DETERMINISTICKÝ

Deterministické modely mají povahu zákonitostí, jež při dodržení určitých předpokladů a podmínek vždy platí, neboli vyhovují každé konkrétní empirické situaci. Pro deterministické modely je charakteristické, že postavení všech veličin v modelu je nesporné a konkrétní hodnoty představují řadu pevně daných čísel. U deterministického modelu je známa nejen jeho struktura, která může být popsána třeba algebraickou nebo diferenciální rovnicí, ale nesporné jsou i hodnoty parametrů.

4.1.1 Zonální model

Výhodou zonálních předpovědních modelů (Marton, Menšík, Starý, 2015) oproti klasickým předpovědním modelům je, že se historicky naměřená data (průměrné měsíční průtoky) v řešeném měsíci, ve kterém se vydává předpověď, rozdělí do zón výskytu. Průměrné měsíční průtoky historické řady se seřadí v řešeném měsíci, na jehož konci je vydávána předpověď (např. ve všech lednech) od nejmenšího k největšímu dle měsíce s posledním měřeným průtokem a rozdělí se do předem určeného počtu zón. Průměrné měsíční průtoky reálné průtokové řady ležící v dané zóně a jejich následné průběhy (délka je určena délkou předpovědi průtoků) tvoří pracovní oblast průtoků (zón). Ostatní historické průběhy reálné průtokové řady nejsou pro tvorbu předpovědi využity. Poté jsou ve zvolené zóně data zbavena asymetrie a z takto transformovaných dat je zkonstruováno trojúhelníkové rozdělení (aproximace hustoty pravděpodobnosti vzhledem k malému počtu realizací v některých zónách). Za předpovězený průtok je vybrán modus předpovědi. Výhodou zatřídění průtoků je, že pokud se průtok, podle kterého je předpověď zatříděna do zóny, nachází v zóně malých průtoků, předpověď bude v rozmezí průtoků, které jsou s uvedenou zónou spojeny historickým výskytem. (Kozel, 2017)

4.2 STOCHASTICKÝ

Na rozdíl od deterministického modelu vyhovuje stochastický model konkrétním situacím jen přibližně a s určitou pravděpodobností. Stochastické modely bývají též označovány jako pravděpodobnostní. Pro stochastické modely je charakteristické, že dovolují poměrně přesnou matematickou manipulaci se vztahy mezi veličinami, i když ve skutečnosti platí tyto vztahy pouze přibližně.

Definice stochastického modelu je jako rovnice nebo soustavy rovnic obsahující náhodné veličiny, nenáhodné veličiny a parametry. Náhodné veličiny jsou proměnné, jejichž hodnoty předem neznáme, jsou dány provedením pokusu nebo pozorováním. Nenáhodné veličiny (někdy též označované jako pevné nebo fixní veličiny) jsou proměnné, jejichž hodnoty určujeme. Parametry jsou známé nebo častěji neznámé konstanty.

Potíže související s konstrukcí stochastického modelu vyplývají z nejistoty, která se týká i některých zcela základních otázek. Na prvním místě je třeba uvést nejistotu týkající se odlišení podstatných a nepodstatných veličin. Výběr proměnných, které by model měl obsahovat, je velmi složitý věcný i empirický problém. Nejistotou pocítujeme i kolem samotné matematické formy modelu. Informace teoretického rázu nemusí být dostatečné pro výběr konkrétní formy modelu. Nejistota se týká i oprávněnosti učiněných předpoklad, přesnosti měření (zjišťování), vhodnosti metody použité k odhadu parametr atd. Matematické modelování je nepřetržitý proces srovnávání našich znalostí, předpoklad a úvah s výsledky zjišťování a s užitečností modelu z hlediska cíl, ke kterým byl sestaven. Modely určené ke zkoumání vztah mezi veličinami se obvykle dělí na modely funkční, modely pro účely řízení a modely predikční. Není třeba zdůrazňovat, že pokud známe skutečný funkční vztah mezi veličinami, jsme přímo v ideální situaci. Můžeme řídit, popř. kontrolovat i předpovídat hodnoty veličin, které jsou předmětem našeho zájmu. Případy, kdy máme podobné modely k dispozici, jsou (odmyslíme-li si definiční vztahy) zcela výjimečné, přičemž funkční vztahy bývají většinou nelineární a obtížně interpretovatelné.

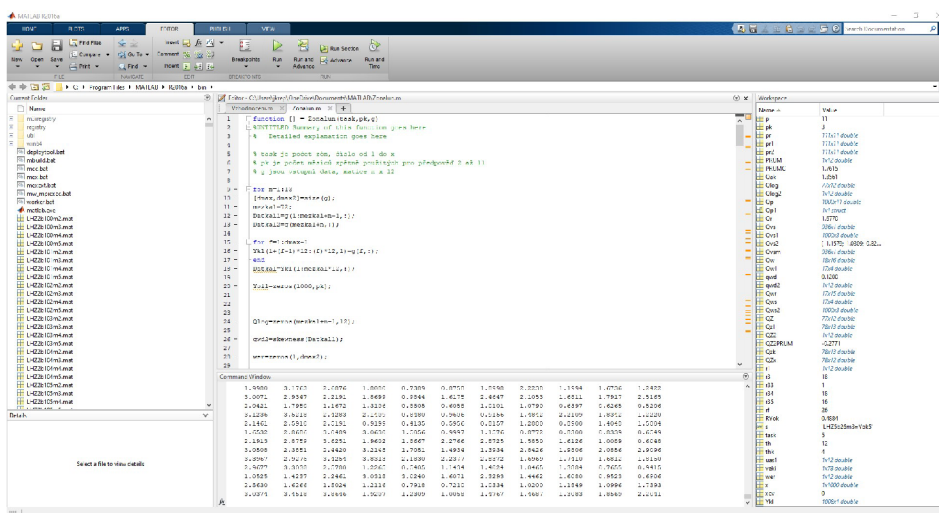
Stochastické modely je možné dále třídit podle řady jiných hledisek. Například podle závislosti na čase rozlišujeme modely statické a dynamické, podle veličin v modelu na spojitě a nespojitě (diskrétní), atd. (Kozel, 2017)

Pro svou bakalářskou práci jsem použil modifikovaný zonální model, který spadá do kategorie stochastických modelů.

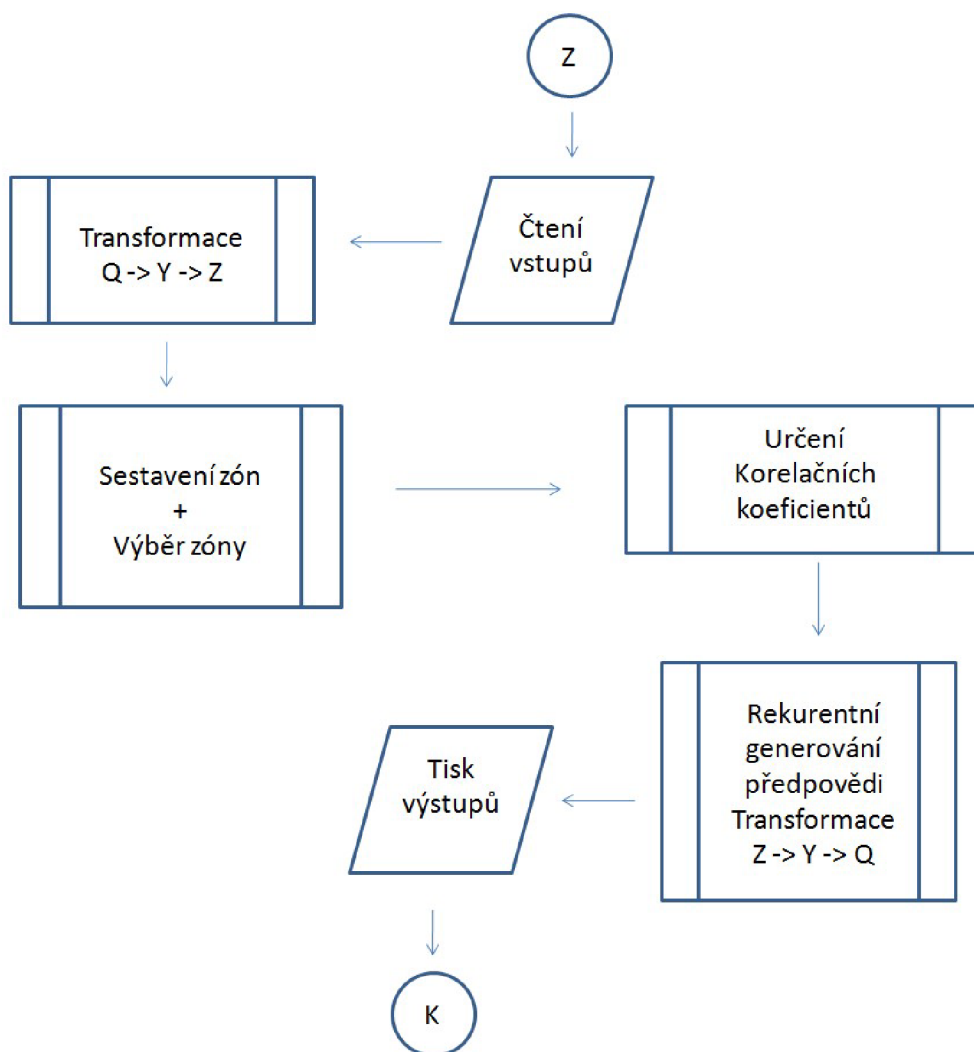
4.2.1 Modifikovaný zonální předpovědní model

Rozdělení pracovní oblasti průtokových řad do zón je provedeno stejně, jako u dříve popsaného zonálního modelu. Modifikovaný zonální model se liší tím, že na vybranou zónu je aplikován lineární autoregresní model. Historicky měřené průtoky se převedou na úroveň hladiny Z podle způsobu popsaného v kapitole 3.2. Zóna je pro pracovní měsíc určena vždy podle posledního naměřeného průtoky. Korelační matice, která je základním vstupem do Yule-Walkerových rovnic, je počítána pouze z historicky měřených průtoků vyskytujících se v přiřazené zóně. Ke zbytku dat nemá model při tvorbě korelační matice přístup. Ze sestavené korelační matice se s využitím Yule-Walkerových rovnic vyčíslí regresní koeficienty. Postup modelu je dále stejný jako v případě lineárního autoregresního modelu. Na obrázku 2 je vyobrazeno schéma modelu a jeho kalibrace a validace. Svislý text u matice měřených dat zobrazuje rozsah měřených roků použitých pro kalibraci (1 - 70) a rozsah měřených průtoků použitých pro validaci (71 -85) pro první krok řešení, protože data pro kalibraci se postupně rozšiřují o již historicky proběhlé roky z pohledu validace (pro 72. rok je již 71. rok historií, a proto může být použit pro kalibraci). Vodorovný text zobrazuje měsíce v roce. (Kozel, 2017)

Model používá jako vstupy reálnou průtokovou řadu, počet měsíců uvažovaných zpětně a počet zón, které budou uvažovány při tvorbě předpovědí. Model byl spuštěn v programu Matlab.



Obr. 4.1 Ukázka prostředí programu Matlab



Obr. 4.2 Blokové schéma modifikovaného zonálního modelu

5 APLIKACE

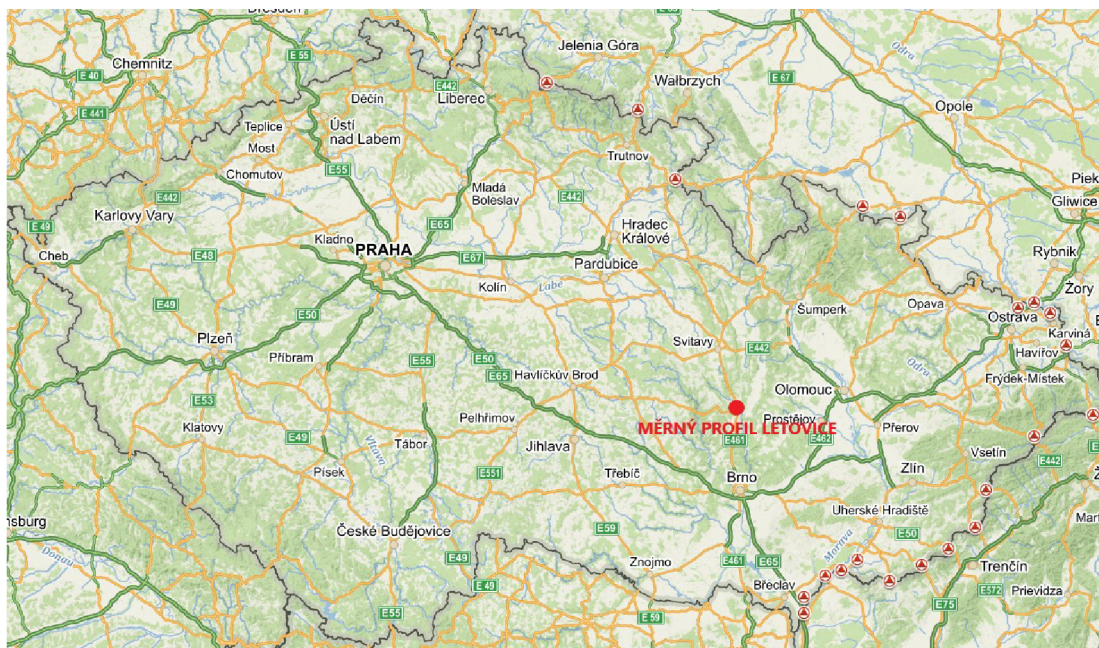
Získaná data pocházejí z měrného profilu Letovice, který se nachází pod soutokem toků a vznikají součtem dvou průtokových řad řek Křetínka a Svitava. Data ignorují vliv mini povodí.

Průtoková řada obsahuje 85 let měření, rozdělených do tabulky o rozměru 85x12. Pro aplikaci byla nutná transformace do normovaného normálního rozdělení. K transformaci bylo využito Cox-Boxovi transformace a transformace na hladinu Z pomocí transformačních vztahů uvedených v kapitolách 3.1 a 3.2.

5.1 ZÁJMOVÁ OBLAST

5.1.1 Měrný profil - Letovice

Měrný profil se nachází u města Letovice v okrese Blansko v Jihomoravském kraji. V použité oblasti se nachází vodní toky Svitava a Křetínka. Řeka Křetínka je ovlivněná vodní nádrží Letovice.



Obr. 5.1 Mapa umístění měrného bodu

Měrný profil se nachází mezi městy Svitavy a Brno jižně od obce Letovice pod továrnou na levém břehu řeky Svitavy. Nad tímto měrným profilem jsou dvě povodí, která jsou popsána v následujících podkapitolách.

5.1.2 Povodí Křetínky

Řeka Křetínka pramení v Třebovském mezihoří 150 m severně od obce Stašov v nadmořské výšce 645 m n. m. Protéká pod hradem Svojanov, dále přes Bohuňov, Křetín až do Letovic, kde se vlévá do řeky Svitavy v nadmořské výšce 340 m n. m. Má upravené břehy koryta, ale bez opevnění. Podél toku jsou vzrostlé stromy a keře. Její celková délka je 29 km.



Obr. 5.2 Vodní tok

Povodí toku se rozkládá na ploše 126,32 km².

Dlouhodobý průměrný průtok Q_a je 0,644 m³/s

Průměrný denní průtok pod přehradou je $Q_{355} = 0,08$ m³/s.

Stav hladiny řeky Křetínky je řízen průtokem z nádrže a základní stav je 11 cm, hladina stoupá až k 30 cm.

Řeka Křetínka se vlévá do Svitavy na 66,4 ř. km a měrný profil Letovice je na ř. km 59,4.

Vodní nádrž Letovice

Nádrž Letovice, která ovlivňuje měrný profil, byla vystavěna mezi roky 1972–1976. Hlavním důvodem výstavby bylo zmírnění dopadů velkého odběru podzemní vody pro Brno na průtokový režim řeky Svitavy. Vodní nádrž má sypanou zemní hráz se středovým jílovým těsněním, které navazuje na 174 m dlouhou injekční clonu v ose hráze. Má lichoběžníkový profil, je přímá a na koruně je pět metrů široká vozovka, sloužící výhradně pro potřeby správce vodního díla. Návodní lic je opevněn hrubým štěrkem, vzdušný lic je zasypán humusem a oset. Hráz je vysoká 28,5 metru nade dnem údolí a 126 metrů dlouhá. U pravého břehu hráze se nachází 31,5 metru vysoká odběrná věž, která je přístupná po ocelové lávce a jsou z ní ovládány odtoky z nádrže a odběry vody pro místní průmysl. Nádrž je využívána pro udržování minimálního průtoku v řece, rekreaci, výrobě elektřiny a rybaření.

Vodní nádrž má objem 11,644 mil. m³ vody a zatopená oblast je o velikosti 111 hektarů.



Obr. 5.3 Vodní nádrž Letovice

Pod nádrží leží na soutoku řek Křetínka a Svitava město Letovice ve kterém žije 6700 obyvatel. Nachází se zde významný průmysl, který odebírá vodu z vodní nádrže. V obci jsou

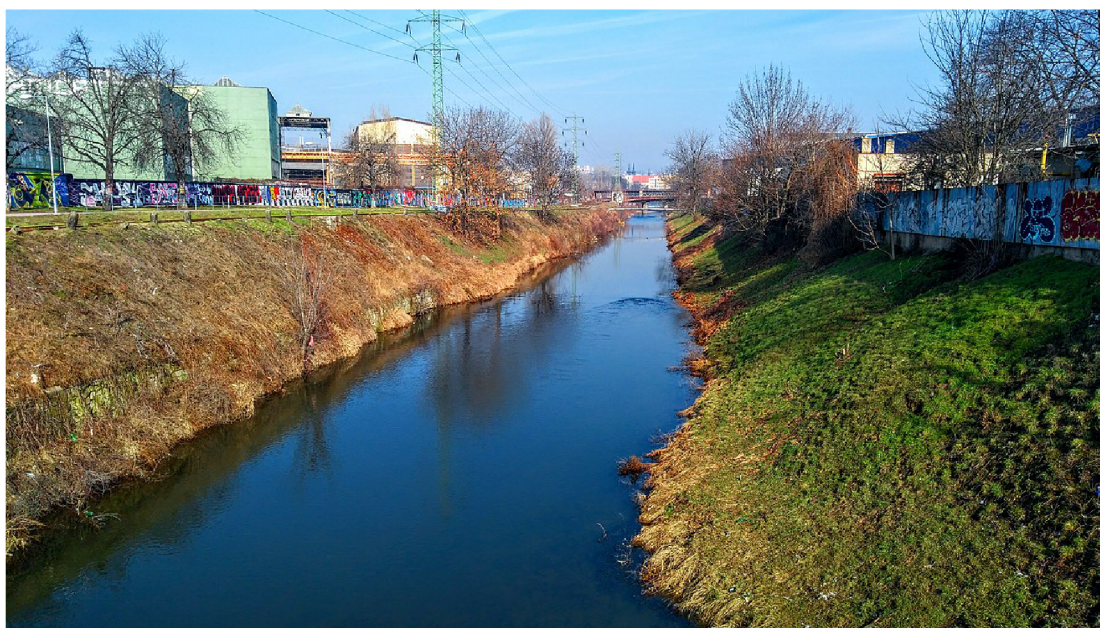
tři mateřské školky, jedna základní škola a střední odborná škola. Letovicemi protéká i řeka Svitava do které se vlévá řeka Křetínka.

5.1.3 Povodí Svitavy

Řeka Svitava pramení v Pardubickém kraji ve Svitavské pahorkatině asi 3 km na severozápad od města Svitavy v nadmořské výšce 471,93 m n.m. Řeka protéká Letovicemi, dále Blanskem a v městě Brně se vlévá do řeky Svatky. Celková délka toku je 98 km a rozloha povodí měří 1150 km². Rozloha povodí nad použitým měřným profilem Letovice je 419 km². Tvar povodí je na přehledné mapě povodí Svitavy viz Obr. 5.5.

Dlouhodobý průměrný průtok Q_a je 2,260 m³/s a tok není ovlivněn vodní nádrží. V letech 1997 a 2006 se v povodí vyskytly mimořádné povodně.

Na řece se nachází čtyři hlásné profily a to Hradec nad Svitavou, Rozhraní, Letovice a Bílovice nad Svitavou. Pro aplikaci na modelu byl použit hlásný profil Letovice.



Obr. 5.4 Svitava v Brně

5.2 KALIBRACE MODELU

Kalibrace modelu probíhala porovnáváním výsledků z různých nastavení modelů. Pro kalibraci byla použita 72-letá průtoková řada. A konec průtokové řady je použit k validaci.

V modelu se nastavuje počet zón a počet měsíců předpovídaných zpětně. Kdy se určuje počet zón do kterých se rozdělí kalibrační data, tedy když je počet zón 6, tak je 72 let rozděleno po 12 letech. Předpovídaný měsíc zpětně, tedy jestli bude předpověď začínat v lednu nebo třeba v červenci.

5.3 VALIDACE

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno ve validačním období 13 let. Vzhledem k velkému množství získaných dat, kdy jedna předpověď obsahuje 1000 hodnot, bylo přistoupeno k naprogramování vyhodnocovacího programu. Výsledky byly zařazeny do třech intervalů pro vyhodnocení. Velikost prvního intervalu byla 0,15 m³/s, velikost druhého 0,45 m³/s a velikost třetího 1,75 m³/s.

Data byla vyhodnocena, vytvořeným programem pro vyhodnocování, program načtl data z modelu a vypočítal kolik výsledků padlo do daného intervalu. Výsledkem je tabulka zobrazující úspěšnosti, se kterými model předpovídá průtoky v toku pro dané měsíce. Úspěšnosti jsou rozděleny podle měsíců a pořadí ve kterém byl měsíc předpovídan.

Ukázka ze zdrojového kódu vyhodnocovacího programu:

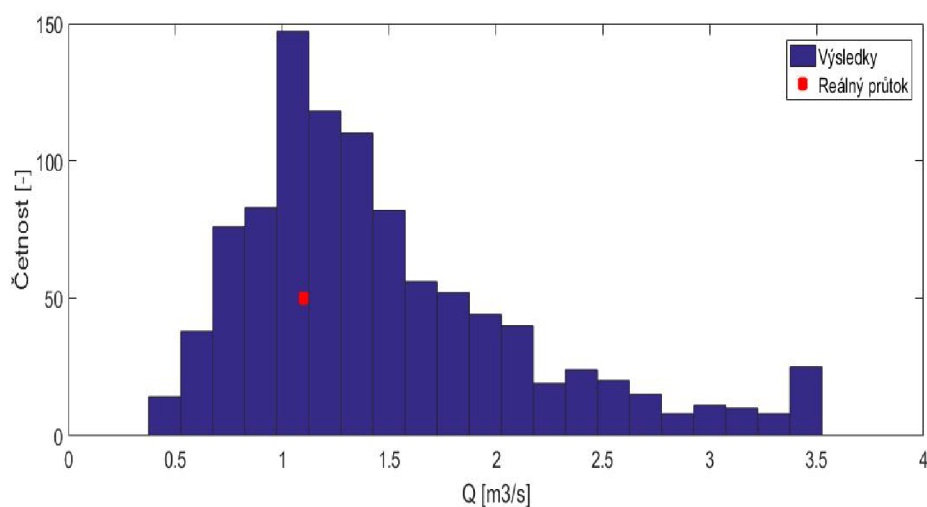
```
for f=1:85
    A1(1+(f-1)*12:(f)*12,1)=g(f,:);
end
for i=1:109
    Qp1=load(['LHZ',int2str(task),'b',int2str(rf),'m',int2str(pk)]);
    Qp=Qp1.(['LHZ',int2str(task),'b',int2str(rf),'m',int2str(pk)]);
    for j=1:11
        b2=0:0.15:20;
        [b1]=histc(Qp(:,j),0:0.15:20);
        Qr=A1(900+j+i-1,1);
        [cr1]=find(Qr>=b2);
        r=max(r1);
        pr(i,j)=b1(r,1);
        pr1(i,j)=sum(b1(r-1:r+1,1));
        pr2(i,j)=sum(b1(r-2:r+2,1));
        clear r
    end
end
end
.
```

5.3.1 Histogramy

Program vyhodnocuje a může zobrazit výsledky pomocí histogramů. V histogramu se zobrazují předpovídané průtoky a reálný průtok. Pro vyhodnocení kvality modelu bylo použito srovnání mezi reálným průtokem a počtem výskytů předpovězených průtoků v jeho blízkosti.

Vyhodnocení pomocí histogramů proběhlo pro všechny předpovězené měsíce (1-12)

Na následujícím obrázku je ukázka histogramu pro první velikost intervalu $0,15 \text{ m}^3$.



Obr. 5.6 Ukázka histogramu

Na ose y je zobrazena četnost výsledků pro určitý interval a na ose x jsou zobrazeny intervaly průtoků v m^3/s .

5.4 VÝSLEDKY APLIKACE

V následující kapitole jsou zobrazeny výsledky v tabulkách, v první části jsou nejuspěšnější výsledky kterých bylo s modelem dosaženo a v druhé části je příklad dalších dosažených výsledků. Každá předpověď je zobrazena ve třech tabulkách podle šířky intervalu. V tabulce nalezneme pravděpodobnosti vyčíslené v % pro každý měsíc. Měsíc je zobrazen v prvním vodorovném řádku a svislý sloupec udává pořadí měsíce v předpovědi. Pokud vezmeme jako příklad měsíc leden a uvažujeme ho jako třetí v předpovědi, nalezneme pravděpodobnost úspěchu ve zvirazněné buňce červeným podbarvením. V tomto případě začne předpověď v měsíci listopadu. Pod tabulkou je popsáno proč se přesnost předpovědi mění.

Nejlepší dosažené výsledky modelu

Nejlepších výsledků bylo dosaženo pokud bylo předpovídáno 3 měsíce zpětně a kalibrační data rozdělena do 6 zón. Výsledná data jsou zobrazena v následujících tabulkách.

Tab. 5.1 Výsledky pro interval 0,15 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6.5	5.0	2.4	4.6	5.3	6.4	6.5	10.2	10.7	10.5	7.5	8.0
2	5.7	3.5	4.6	4.2	7.4	6.2	8.2	11.5	10.1	9.3	9.2	6.9
3	3.0	4.2	4.6	7.4	5.2	8.3	9.6	8.7	7.6	9.0	6.3	6.8
4	5.3	4.3	7.0	5.3	8.9	8.8	7.6	7.5	9.9	6.5	6.4	2.5
5	5.5	6.2	4.5	8.5	9.1	7.7	7.2	8.3	6.2	6.6	2.6	3.6
6	6.7	3.9	8.5	8.6	7.3	7.5	7.7	6.2	6.2	2.3	4.0	5.2
7	3.5	8.3	9.1	6.9	7.1	7.8	5.3	5.9	2.4	3.9	5.6	6.4
8	8.0	8.3	8.1	6.6	6.6	5.4	5.0	2.4	4.3	5.4	5.9	6.4
9	8.5	8.4	6.5	6.8	5.1	5.1	2.2	4.1	5.7	5.6	6.1	6.3
10	7.9	6.3	6.4	5.2	4.6	2.3	3.9	5.8	6.2	6.4	6.0	5.3
11	6.5	5.6	4.6	4.9	2.3	3.8	4.5	5.9	5.8	6.3	5.7	5.0

V této tabulce jsou výsledky přesnosti malé, protože je zadán velmi úzký interval průtoků. I přesto je pravděpodobnost u stabilních měsíců přes 10 % že předpovídaný průtok nastane.

Tab. 5.2 Výsledky pro interval 0,45 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	18.1	14.7	6.2	13.8	16.1	19.1	19.2	29.3	32.9	32.0	22.0	24.6
2	18.9	10.3	14.1	12.8	20.8	18.4	24.6	33.7	29.8	26.5	26.4	20.0
3	8.8	12.9	14.7	21.6	15.0	24.7	28.5	26.7	23.8	24.9	18.7	20.9
4	15.1	12.8	20.2	14.5	25.5	26.3	22.7	22.7	28.9	18.6	19.7	7.2
5	15.4	18.1	13.5	25.6	24.7	23.2	20.6	24.5	19.2	20.0	7.2	11.8
6	19.3	11.7	24.7	24.8	21.9	22.4	23.2	17.3	19.0	6.8	12.6	16.0
7	11.6	24.4	26.0	22.0	20.5	24.2	15.4	18.9	6.9	12.0	16.4	19.0
8	23.4	24.5	23.1	19.5	19.8	16.0	15.7	7.2	12.6	16.6	16.7	18.6
9	25.4	23.0	18.7	20.5	15.6	16.2	6.7	12.8	16.6	17.5	17.9	18.0
10	23.4	17.9	19.2	16.0	13.7	7.1	11.9	16.8	17.8	18.2	18.0	16.5
11	19.8	17.8	15.4	14.4	7.1	11.9	14.1	17.6	17.3	18.5	17.0	16.9

V této tabulce zapadají výsledky do intervalu 0,45 m³/s což je při dlouhodobém průměrném průtoku kolem 2,2 m³/s optimální nastavení. Přesnosti v tomto případě překračují 20 – 30 %.

Tab. 5.3 Výsledky pro interval 1,75 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	30.8	23.6	12.8	22.7	27.2	30.5	29.9	44.7	51.9	50.5	36.1	38.1
2	30.8	17.2	22.4	21.1	33.1	29.4	40.1	51.8	47.9	40.6	41.6	32.8
3	14.3	21.7	24.0	34.3	23.6	39.0	44.4	42.7	39.5	41.4	30.7	33.8
4	24.9	21.2	33.3	22.1	39.7	41.6	36.9	36.4	45.7	30.9	32.1	12.7
5	24.4	29.8	22.1	40.0	39.1	36.2	33.6	38.3	31.1	32.9	13.2	19.5
6	32.0	19.3	38.6	39.4	34.6	36.5	36.1	28.0	31.3	12.4	21.3	27.1
7	19.9	37.9	40.7	35.5	33.1	38.7	26.3	30.5	12.4	20.8	28.2	29.6
8	36.7	38.6	36.4	31.9	31.9	27.5	26.4	13.5	21.6	28.6	27.3	29.4
9	39.6	35.8	31.0	32.2	26.6	27.1	13.5	21.6	29.0	28.1	30.2	29.0
10	37.7	30.4	31.1	26.1	22.8	14.7	19.9	29.5	28.5	29.9	28.2	27.6
11	31.7	28.9	25.5	23.3	14.0	20.0	25.5	28.2	29.1	28.8	27.5	27.5

V poslední tabulce je interval široký 1,75 m³/s což už je skoro jako velikost průměrného dlouhodobého průtoku, proto jsou výsledky místy i přes 50% přesnosti.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo pro měsíc září, protože se jedná o málo vodný měsíc a předpověď neovlivňují krátké intenzivní srážky ani tání sněhu. Také jsou tyto měsíce ovlivněny chováním nádrže, protože je v toku udržován stálý minimální průtok. Dobrých výsledků bylo dosaženo i v dalších suchých měsících, jako je říjen nebo srpen.

Nejhorší předpověď je pro měsíc březen, protože je předpověď ovlivňována táním sněhu.

Jak můžeme vidět v tabulce přesnost předpovědi se s narůstající délkou předpovědi zhoršuje. A některé se zhorší ale ke konci se zase zlepšují, to je dáno tím, že za předpokladu stabilního období se předpověď zpětně přibližuje danému měsíci.

Další dosažené výsledky

Další uvedené výsledky byly dosaženy pokud bylo předpovídáno 7 měsíců zpětně a kalibrační data rozdělena do 3 zón. Výsledná data jsou zobrazena v následujících třech tabulkách.

Tab. 5.4 Výsledky pro interval 0,15 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	5.9	4.8	2.4	4.7	5.5	6.5	7.0	10.1	11.6	10.8	7.4	7.9
2	6.1	3.0	5.1	4.3	7.2	6.6	8.4	12.0	10.4	9.6	8.9	6.4
3	2.9	4.5	5.0	7.4	5.1	8.3	9.5	9.6	7.8	9.6	6.3	6.8
4	5.3	4.6	6.8	5.1	9.1	8.7	8.4	7.4	9.5	6.8	6.2	2.2
5	5.2	6.4	4.1	8.4	8.7	7.8	7.3	8.0	6.4	7.2	2.4	4.3
6	6.8	4.3	9.0	8.5	7.7	7.8	7.5	5.8	6.5	2.4	4.0	5.4
7	4.1	8.6	8.7	7.8	7.0	8.0	5.4	6.5	2.3	4.3	5.4	6.7
8	8.1	8.4	8.0	6.4	7.0	5.6	5.0	2.4	4.3	5.5	5.9	6.1
9	8.8	7.3	6.2	6.6	5.2	5.2	2.3	4.4	5.3	6.0	6.6	6.1
10	8.3	6.3	6.4	5.3	4.6	2.6	4.3	5.8	5.9	6.4	5.4	6.2
11	6.5	5.7	5.4	4.9	2.6	3.8	5.3	5.9	6.4	6.3	5.9	5.6

Tab. 5.5 Výsledky pro interval 0,45 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	17.8	14.2	6.6	13.4	15.7	19.2	19.9	28.6	33.7	32.9	23.3	25.1
2	18.4	10.1	13.9	12.2	20.5	18.6	25.5	33.5	30.7	27.2	27.4	19.3
3	8.7	12.8	15.0	22.0	14.6	24.6	28.9	27.0	24.8	27.4	18.8	20.3
4	15.4	13.0	20.3	14.8	26.1	26.3	23.8	22.1	28.7	19.4	20.0	7.1
5	14.8	19.3	13.4	25.2	24.7	23.0	20.7	23.3	18.9	20.2	7.3	13.0
6	19.7	12.4	24.7	25.2	21.5	22.6	22.5	17.4	19.9	7.0	13.4	16.8
7	12.5	23.8	25.7	22.3	20.3	23.9	16.2	19.0	6.8	13.2	16.3	18.9
8	23.9	24.6	23.5	20.0	20.9	17.1	15.5	7.0	12.7	17.6	18.0	18.4
9	26.2	21.1	19.6	19.8	15.9	15.9	7.3	13.3	16.8	17.9	19.0	17.8
10	24.4	19.1	19.5	16.5	14.4	7.7	12.5	17.3	18.0	18.4	17.6	18.2
11	19.8	18.8	15.7	14.3	7.6	11.7	15.1	17.9	19.0	17.5	17.5	16.5

Tab. 5.6 Výsledky pro interval 1,75 m³/s

Pořadí\Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	30.1	23.6	13.2	22.1	26.4	29.8	30.7	44.4	51.9	50.2	37.8	38.4
2	29.8	16.7	22.8	20.4	33.4	29.3	41.7	51.4	47.7	42.8	43.4	31.7
3	14.3	21.2	24.8	35.0	23.2	39.1	45.9	42.7	40.4	45.2	30.6	33.7
4	25.6	21.6	32.9	22.7	40.1	42.8	38.2	34.9	45.1	31.7	32.5	12.9
5	24.3	30.9	22.2	39.9	39.1	36.3	34.4	37.0	31.3	32.6	13.3	21.5
6	32.3	20.6	38.9	39.0	34.6	36.1	35.2	28.4	31.7	12.0	22.4	27.6
7	20.3	37.9	40.5	36.0	32.5	38.1	26.7	31.2	12.6	22.2	28.9	29.5
8	37.1	38.4	37.3	32.3	32.6	28.3	25.9	13.8	21.2	29.8	28.3	29.9
9	40.7	34.9	32.2	31.9	26.1	26.8	14.5	21.7	28.3	29.2	30.8	28.8
10	38.0	31.0	31.4	26.8	23.3	15.1	20.2	29.8	29.2	30.0	28.9	29.1
11	32.0	30.6	25.5	23.5	15.0	20.0	25.6	28.5	30.5	28.9	28.2	27.4

6 ZÁVĚR

Byl sestaven model, který byl aplikován na měrný profil Letovice nacházející se na řece Svitavě pod soutokem s řekou Křetínkou. Měrný profil je ovlivněný, protože na toku Křetínka je vodní nádrž Letovice. Model je možné použít i na další toky, proto je model přenositelný.

Byla zkoušena různá nastavení předpovědního modelu, kdy se měnily podmínky předpovědi, kterými jsou počet zón a počet měsíců zpětně předpovídaných. Jednotlivé výsledky se vyhodnocovaly naprogramovaným programem na základě rozřídění do třech intervalů a dopočítáním pravděpodobnosti s jakou předpovídaný průtok padne do daného intervalu. Výsledky jsou zaznamenány v tabulkách pro každý měsíc a každý měsíc je předpovídan z různé časové pozice. Buď jako první v předpovědi, nebo jako x-tý v řadě.

Model dosahuje dobrých výsledků v málo vodných měsících jako jsou srpen a září, protože je zde stabilnější chování. Průtok je zde také ovlivněn vodní nádrží, kdy se upouštěním vody udržuje minimální průtok v korytě, který je stabilní. V jamích měsících, jako je třeba březen, je model méně přesný, protože jsou průtoky ovlivněny táním sněhu. Celkově přesnost předpovědi s narůstající délkou klesá. Výjimku tvoří stabilní období, kdy úroveň předpovědi nejprve klesá a následně stoupá, protože se předpověď opět přibližuje k předpovídanému měsíci.

Některé neshody s předchozími tvrzeními mohou být způsobeny manipulací na vodním díle. Na základě zjištěných výsledků byl model vyhodnocen jako dobrý.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] American Water Works Association. *Water Quality and Treatment : A Handbook of Community Water Supplies*. Fourth Edition. New York : McGraw-Hill, 1990. 1193 s. ISBN 0-07-001540-6.
- [2] MIKEŠ, Jan. *Riziková analýza úpraven vody*. Brno, 2010. 145 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] KOZEL, Tomáš. *Stochastické řízení zásobní funkce nádrže s pomocí metod umělé inteligence*. Brno, 2017. 131 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně,
- [4] *Ústav vodního hospodářství obcí* [online]. 2010 [cit. 2010-11-08]. Dostupné z WWW: <water.fce.vutbr.cz>.
- [5] <http://www.pmo.cz/cz/stav/1013/>
- [6] Charakteristiky toků a povodí ČR. Oddělení geografických informačních systémů a kartografie: Projekty: Charakteristiky toků a povodí ČR [online]. Praha: VÚV TGM, veřejná výzkumná instituce - Odbor ochrany vod a informatiky - Oddělení GIS, 2014 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/24/charakteristiky-toku-a-povodi-cr.html>
- [7] Starý M., 2006: Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01), VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2006.
- [8] <https://www.google.cz/maps/>
- [9] <http://hydro.chmi.cz>
- [10] https://cs.wikipedia.org/wiki/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%A1_D

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 Výsledky pro interval 0,15 m ³ /s.....	18
Tab. 5.2 Výsledky pro interval 0,45 m ³ /s.....	19
Tab. 5.3 Výsledky pro interval 1,75 m ³ /s.....	19
Tab. 5.4 Výsledky pro interval 0,15 m ³ /s.....	20
Tab. 5.5 Výsledky pro interval 0,45 m ³ /s.....	20
Tab. 5.6 Výsledky pro interval 1,75 m ³ /s.....	21

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1 Ukázka prostředí programu Matlab	9
Obr. 4.2 Blokové schéma modifikovaného zonálního modelu	10
Obr. 5.1 Mapa umístění měrného bodu	11
Obr. 5.2 Vodní tok.....	12
Obr. 5.3 Vodní nádrž Letovice	13
Obr. 5.4 Svitava v Brně	14
Obr. 5.5 Tvar povodí řeky Svitavy [5]	15
Obr. 5.6 Ukázka histogramu	17

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A ...	plocha [m ²]
V ...	objem [m ³]
v ...	rychlost proudění [m.s ⁻¹]
Q ...	průtok [m ³ .s ⁻¹]
Task ...	Zóna předpovědi
Pk...	předpovídaný měsíc zpětně
N(0,1) ...	Normální normované rozdělení

SUMMARY

A model was built, which was applied to the specific profile of Letovice located on the river Svitava below the confluence with the river Křetínka. The specific profile is affected because the Letovice reservoir is on the Křetínka river. The model can be used for other flows, so the model is transferable.

Various settings of the forecasting model were tested, when the forecasting conditions were changed, which are the number of zones and the number of months back-predicted. The individual results were evaluated by a programmed program on the basis of sorting into three intervals and calculating the probability with which the predicted flow will fall within the given interval. The results are recorded in tables for each month and each month is predicted from a different time position. Either first in the prediction or first in line.

The model achieves good results in low water months such as August and September because there is more stable behavior. The flow is also affected by the water tank, where the minimum flow in the riverbed is maintained by dropping the water, which is stable. In the spring months, such as March, the model is less accurate because flows are affected by melting snow. Overall, the accuracy of the forecast decreases with increasing length. An exception is the stable period, when the forecast level first decreases and then rises, as the forecast approaches the forecast month again.

Some discrepancies with the previous statements may be caused by manipulation of the waterworks. Based on the results, the model was evaluated as good.