



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY**

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

## KONSTRUKCE PŘEDPOVĚDNÍHO MODELU PRO PRŮTOK VODY VE VYBRANÉM MĚRNÉM PROFILU

CONSTRUCTION OF FORECAST MODEL FOR WATER FLOW IN THE MEASUREMENT  
PROFILE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Pavel Škarecký**

**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	Pavel Škarecký
Název	Konstrukce předpovědního modelu pro průtok vody ve vybraném měrném profilu
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 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, m. návody do cvičení 1. vyd. Brno, VUT Brno, 1987.
- Nacházel, K., Starý, M., Zezulák, J.: Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství, kniha, 320 s., Academia, 2004, ISBN 80-200-0229-4.
- Hirsh, R. M., Syntetic Hydrology and Water Supply reliability, Water Resources Research, No. 6, December, 1979.
- Svanidze, G. G., Mathematical Modelling of Hydrological Series and Some Problems of Long-Term River Runoff Control, AN Gruz. SSSR, 1961, Vol. 14. p. 189–216.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

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

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT „Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací“ a platné Směrnice děkana „Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT“ (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT „Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací“ a platné Směrnice děkana „Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT“ (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

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

## **ABSTRAKT**

Předmětem této bakalářské práce byla konstrukce a kalibrace předpovědního modelu pro průtok vody v měrném profilu na řece Dyji v obci Podhradí nad Dyjí. Práce je rozdělena na část teoretickou a výpočtovou. V teoretické části je popsána transformace historických dat, druhy pravděpodobnostních modelů a momentální problémy se suchem. Ve výpočtové části je popsáno zájmové území, rozdělení průtoků do zón výskytu a následné určení ideálního kvantilu. Na závěr je porovnáno jednotlivé nastavení modelu a vyhodnocení výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

stochastický předpovědní model, průměrný měsíční průtok, měrný profil, rozdělení do zón výskytu, ideální kvantil

## **ABSTRACT**

The subject of this bachelor thesis was the construction and calibration of a prediction model for water flow in a specific profile on the river Dyje in the village Podhradí nad Dyjí. The work is divided into theoretical and computational part. The theoretical part describes the transformation of historical data, types of probabilistic models and current drought problems. The computational part describes the stochastic model, the distribution of flows into zones of occurrence and the subsequent determination of the ideal quantile. Finally, the individual settings of the model and the evaluation of the results are compared.

## **KEYWORDS**

stochastic prediction model, average monthly flow, specific profile, division into occurrence zones, ideal quantile

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Škarecký, Pavel. *Konstrukce předpovědního modelu pro průtok vody ve vybraném měrném profilu*. Brno, 2020, 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Konstrukce předpovědního modelu pro průtok vody ve vybraném měrném profilu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2020

---

Pavel Škarecký  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Konstrukce předpovědního modelu pro průtok vody ve vybraném měrném profilu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2020

---

Pavel Škarecký

autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Tomáši Kozlovi, Ph.D., za odborné vedení, připomínky a cenné rady, které mi dával během vypracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat svým rodičům za trpělivost, psychickou a finanční podporu, jež mě po celou dobu studia provázela, a v neposlední řadě ČHMÚ za poskytnutá historická data, bez kterých by bylo provedení práce nemožné.



## OBSAH

1	Úvod .....	11
2	Cíl bakalářské práce .....	14
3	Metody.....	15
3.1	Klasifikace modelů.....	15
3.1.1	Pravděpodobnostní modely.....	16
3.1.2	Deterministický model.....	16
3.1.3	Metody umělé inteligence.....	20
3.1.4	Stochastický model .....	21
3.1.5	Předpovědní modely využívané v hydrologii .....	22
3.2	Transformace historických dat.....	26
3.2.1	Normální rozdělení a normované normální rozdělení .....	27
4	Čáry překročení .....	30
4.1	Možnosti zpracování teoretických čar překročení .....	30
4.2	Možnosti zpracování empirických čar překročení .....	31
4.3	Čáry opakování .....	33
5	Software.....	34
5.1	Matlab .....	34
6	Aplikace.....	35
6.1	Zájmová oblast .....	35
6.2	Řeka Dyje.....	36
6.2.1	Nejvyšší body řeky .....	39
6.2.2	Objekty v zájmovém území, ovlivňující průtoky .....	40
6.3	Měrný profil .....	43
6.4	Vodní nádrž Vranov .....	48
6.4.1	Vznik díla.....	49
7	Práce s daty (kalibrace a validace) .....	52
7.1	Aplikace modelu a vyhodnocení výsledků .....	53
8	Závěr.....	57
9	Použitá literatura.....	58
10	Seznam zkratk a symbolů .....	61

11	Seznam obrázků.....	62
12	Seznam tabulek.....	64

# 1 ÚVOD

V posledních letech po jarním tání trápí vodohospodáře a rekreační nadšence v rámci České republiky neobvyklé sucho. To bylo možné sledovat již v letech 2016 a 2017, kdy sice byla situace na začátku roku překvapivě dobrá, ale poté se zhoršila. Stejně tomu bylo i v následujících letech. Průběh roku 2020 momentálně nedokážeme určit, ale první měsíce nepřinesly v podstatě žádné zásoby sněhové pokrývky, proto nemůžeme počítat s nějakým radikálním zlepšením. Ze zmíněných faktů vyplývá, že je vhodné tomuto problému věnovat pozornost.

Opakem extrémního sucha jsou povodně. V minulosti byl v zájmové oblasti Podhradí nad Dyjí a nejen tam vznik extrémních problémů velmi častý. Povodňové ohrožení představuje řeka Dyje, která již při nižších průtocích zasahuje do intravilánu obcí. Potíže způsobuje i zvýšená hladina podzemní vody, která zaplavuje níže položené pozemky a sklepy. Vodní stav hladiny dlouhodobě kolísá lehce nad hranicí sucha. Na začátku roku 2020 hladina kolísala okolo 40 cm výšky na 26 m šířky koryta, s průtokem  $2.72 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$ . Z přehrad je to Vranovská přehrada, na kterou má přítok Dyje z Podhradí nemalý vliv.

Následky sucha pociťují i zemědělci. Tyto extrémy souvisí s probíhající změnou klimatu, kde se projevují delším obdobím sucha s větším počtem přívalemých dešťů, které zemědělcům ztěžují kvalitní obhospodařování půdy. Následkem špatného obdělávání poté dochází ke smyvu půdy, zhoršují se její fyzikálně-chemické vlastnosti, zmenšuje se mocnost půdního profilu, zvyšuje se štěrkovitost. To způsobuje ztráty osiv, sadby, hnojiv a přípravků na ochranu rostlin a tím se samozřejmě snižují i hektarové výnosy a vznikají další problémy.

Tyto extrémy se s dopady na přírodu a společnost studují v českých zemích od 16. století, kdy se výzkumníci snažili zkoumat hydrologické údaje pomocí barevných značek na kamenech trčících z vody a dalších pomůcek odpovídajících dané době. V novodobé historii se používají údaje s pomocí daleko vyspělejší techniky (měření v měrných profilech). Na Moravě se díky novým technologiím měří přibližně od 20. století. Analyzují se extrémně teplé, chladné, vlhké i suché měsíce, vichřice, povodně, mrazy i krupobití, a to na základě měřených údajů z měrných stanic nebo

například z písemných zpráv o počasí. Díky těmto přístrojům a vědcům, zabývajícím se uvedenou problematikou, se dá přesněji odhadnout výskyt zmíněných problémů a je možné na ně lépe reagovat, ať už jde o jakýkoliv extrém.

Hydrologická prognóza neboli předpověď je opodstatněné stanovení vzniku vývoje určitého jevu na určitou dobu dopředu. Podle charakteru se dělí na upozorňovací, která nám řekne, že je možnost výskytu jevu nebo je kvantifikována, tedy popisuje dynamiku změny určité veličiny.

Rozvoj předpovědních modelů s sebou přináší možnost vytvářet dostatečně přesné predikce s čím dál delší dobou platnosti.

Vhodné zvolení konkrétního předpovědního přístupu je pro danou predikci velice zásadní. Nevhodně zvolený přístup může vést lidi k podhodnocení a podcenění situace, jež může mít dopad, jakým je například ztráta majetku. V hydrologii se nejčastěji měří po pěti, deseti i patnáctiminutových krocích. Pracuje se s měsíčními průtoky (dále  $Q_p$ ) značenými v měrných profilech, a je tedy vyžadována předpověď po hodinových, denních, ročních i delších intervalech. Pro danou práci byly použity historické záznamy z profilů v dané oblasti, a to průměrné měsíční průtoky.

Cílem práce je konstrukce předpovědního modelu, jehož výsledky se prokáží co nejmenší chybou a následně zvolí ideální kvantil. Pro předpověď průtoků byl vybrán stochastický model. Výhodou daného modelu je, že dává při stejných vstupních parametrech na výstupu různé výsledky a můžeme sestavit pro každý měsíc model zvlášť. Pro danou práci byl zvolen především z důvodu přístupnosti dat. Konstrukce hydrologického modelu je podstatně složitější a bylo by potřeba zohlednit i doznívání srážek z minulého měsíce, protože se počasí většinou mění.

V našem případě jsme se rozhodli vytvořit model na předpověď jeden měsíc dopředu. Známe i model matematický, ale ten bychom použili na předpověď srážek z důvodu možnosti aplikovat větší počet vstupů. Naše volba je ideální pro problematiku sucha a menší náročnost modelu.

Předpovězená průtoková řada se bude následně porovnávat se skutečnou průtokovou řadou a díky odchylkám mezi skutečností a predikcí poznáme, zda je matematický model dostatečně korektní a jak mu můžeme důvěřovat. Uvedené metody vyžadují znalost matice, vstupních i výstupních vzorů, ke kterým bude využit software Matlab od

společnosti MathWorks. Jedná se o interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. Vybraná lokalita pro predikci se nachází západně od Vranova nad Dyjí na česko-dolnorakouské hranici a na pravém břehu řeky Dyje.

## 2 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem práce bude sestavení předpovědního modelu pro průtok vody v námi určeném měrném profilu na jeden měsíc dopředu. V práci bude vyhodnocen každý měsíc zvlášť. Ověřením kvality délky předpovědi zjišťujeme, že čím déle trvající předpověď máme, tím kratší je procento pravdivosti a přesnosti. Vytvoření takového předpovědního modelu spočívá v určení správného algoritmu, který je schopen pomocí pravděpodobnosti určit průtoky na daném měrném profilu. Cílem každého předpovědního modelu je to, aby chyba, která nám určuje výsledek, byla co nejmenší. K práci bude použit stochastický předpovědní model a k vytvoření algoritmu bude využit software s interakčním prostředím Matlab (Mathworks, 1984–2020).

## 3 METODY

Předpovědní modely jsou abstraktní, používající matematický zápis k popisu systémového chování soustavy. Nejčastěji jsou využívány v přírodních a inženýrských vědách, jako jsou biologie, fyzika a například elektrotechnika, ale i v oblasti sociálních věd, kupříkladu v sociologii nebo ekonomii.

Nejčastěji se tedy s matematickými modely setkají fyzici, inženýři, informatici a ekonomové. V hydrologii se používají především k predikci (předpovědi) a pochopení hydrologických procesů.

Dalším typem jsou hydrologické modely, kde je výsledek ovlivňován kromě historicky hydrologických vstupů, jako jsou stavy, manipulace na vodních dílech a průtoky, také převážně meteorologickými vstupy. Ty ale budou v práci zanedbány z důvodu přístupu dat.

Tato kapitola se dále zabývá seznámením a popsáním jednotlivých matematických a hydrologických modelů, transformaci historických dat a vhodným zvolením modelu pro danou situaci.

### 3.1 Klasifikace modelů

#### Matematické

**Lineární a nelineární** – pokud se funkce s podmínkami a omezeními vyskytují ve formě lineárních rovnic, můžeme model nazvat lineární. Pokud už jen jedna jediná podmínka, nebo omezení bude reprezentováno nelineární rovnicí, pak bude model nelineární.

**Deterministické a stochastické (pravděpodobnostní)** – budou popsány v kapitole 2.1.1 Pravděpodobnostní modely.

**Statické a dynamické** – statický model zobrazuje a analyzuje systém bez zřetele k jeho časovému vývoji. Zobrazení se týká zpravidla určitého časového intervalu (týden, měsíc, rok apod.). Dynamický model zobrazuje a analyzuje systém v průběhu času. Zobrazení může být typu „ex post” nebo „ex ante” a respektovat krátký, či delší časový horizont [1].

**Soustředěné parametry a rozložené parametry** – pokud je model homogenní (v konzistentním stavu v každé části systému), parametry jsou soustředěny. Pokud je systém heterogenní (rozdílný stav v různých částech systému), jsou parametry rozloženy. Rozložené parametry jsou obvykle reprezentovány parciálními diferenciálními rovnicemi.

### 3.1.1 Pravděpodobnostní modely

Pravděpodobnostní modely jsou právě ty, které hledají maximální hodnotu věrohodnosti a dělí se na deterministické a stochastické. Deterministický model vykazuje po opakování pokusu za stejných počátečních podmínek stejné chování, zatímco při stochastickém modelu je přítomna náhoda, i když jsou počáteční podmínky stejné. V naší práci nebyly jasné vstupy proti výstupům, právě z toho důvodu byl vybrán model stochastický, ale nikoliv deterministický.

### 3.1.2 Deterministický model

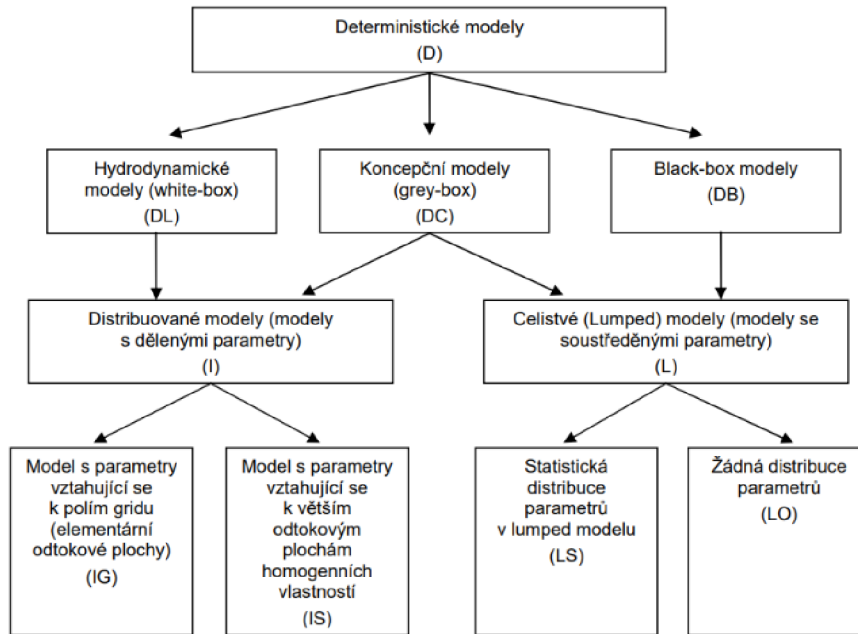
Při použití a tvorbě deterministického modelu je důležité užít veškeré veličiny, které mají nulový rozptyl a nepodléhají žádným náhodným vlivům. Je to právě z toho důvodu, že model přesně určuje výstup, a tak dosahuje stále stejného výsledku [2].

Jedná se především o rovnici, kde jsou na jedné straně závislé proměnné výstupy a na druhé straně nezávislé proměnné vstupy. Podle pana Jeníčka jde tento vztah zapsat rovnicí:

$$y = f(x, a), [3] \tag{1}$$

kde  $a$  jsou koeficienty nebo parametry chování systému. V aplikované hydrologii mají deterministické modely za úkol popsat fyzikální chování celého, nebo jen z části hydrologického cyklu. Jsou vždy spojovány s časovými proměnnými, pro které neplatí žádné rozdělení pravděpodobností a jejich vzájemné vztahy jsou ryze příčinné neboli deterministické [3] [4].





Obr. 1 Rozdělení deterministického modelu [4]

### 3.1.2.1 Zonální model

Jak v zahraničí, tak i u nás byly popsány různé metody tvorby střednědobých až dlouhodobých prognóz průměrných měsíčních toků. Používají se algoritmy založené na stochastickém modelování časových řad.

Zonální pravděpodobnostní předpovědní model je program, který umožňuje předpovídat průměrné měsíční průtoky na základě aktuálního průtoku s možností volby předpovědi od jednoho po dvanáct měsíců [11].

Výhodou zonálních předpovědních modelů oproti klasickým předpovědním modelům je, že se historicky naměřená data (průměrné měsíční průtoky) v řešeném měsíci, kdy se vydává předpověď, rozdělí do zón výskytu.

Data historické řady se seřadí v řešeném měsíci 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, 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 něhož je předpověď zařazena do zóny, nachází v zóně malých průtoků, předpověď bude v rozmezí průtoků spojených historickým výskytem s uvedenou zónou [12].

Výstup ze zonálního pravděpodobnostního předpovědního modelu tvoří předpovězené průměrné měsíční průtoky na jeden měsíc nebo více měsíců vpřed [11].

### 3.1.2.2 Modifikovaný 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 určena vždy podle posledního naměřeného průtoků. 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 níže uvedených Yule-Walkerových rovnic vyčíslí regresní koeficienty. Postup modelu je dále stejný jako v případě lineárního autoregresního modelu. Na obrázku 2 je vyobrazeno schéma modelu. Svislý text u matice měřených dat zobrazuje rozsah měřených roků použitých pro kalibraci (1–60) a rozsah měřených průtoků použitých pro validaci (61–75) pro první krok řešení, protože data pro kalibraci se postupně rozšiřují o již historicky proběhlé roky z pohledu validace (pro 62. rok je již 61. rok historií, a proto může být použit pro kalibraci). Vodorovný text zobrazuje měsíce v roce. Symboly rovnice v obr. 2 jsou vysvětleny v rovnici níže [13].

Daná práce se liší tím, že byla sestavena čára překročení, z níž se následně odečetl kvantil. To bylo aplikováno pro následující měsíce. Klasický zonální model odečítá nejčastěji střední hodnoty.

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho(1) & \dots & \rho(k-2) & \rho(k-1) \\ \rho(1) & 1 & \rho(1) & \dots & \rho(k-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(1) & \dots & \rho(1) & 1 & \rho(1) \\ \rho(k-1) & \rho(k-2) & \dots & \rho(1) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_{k-1} \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho(1) \\ \rho(2) \\ \dots \\ \rho(k-1) \\ \rho(k) \end{pmatrix}, \quad [13] \quad (2)$$

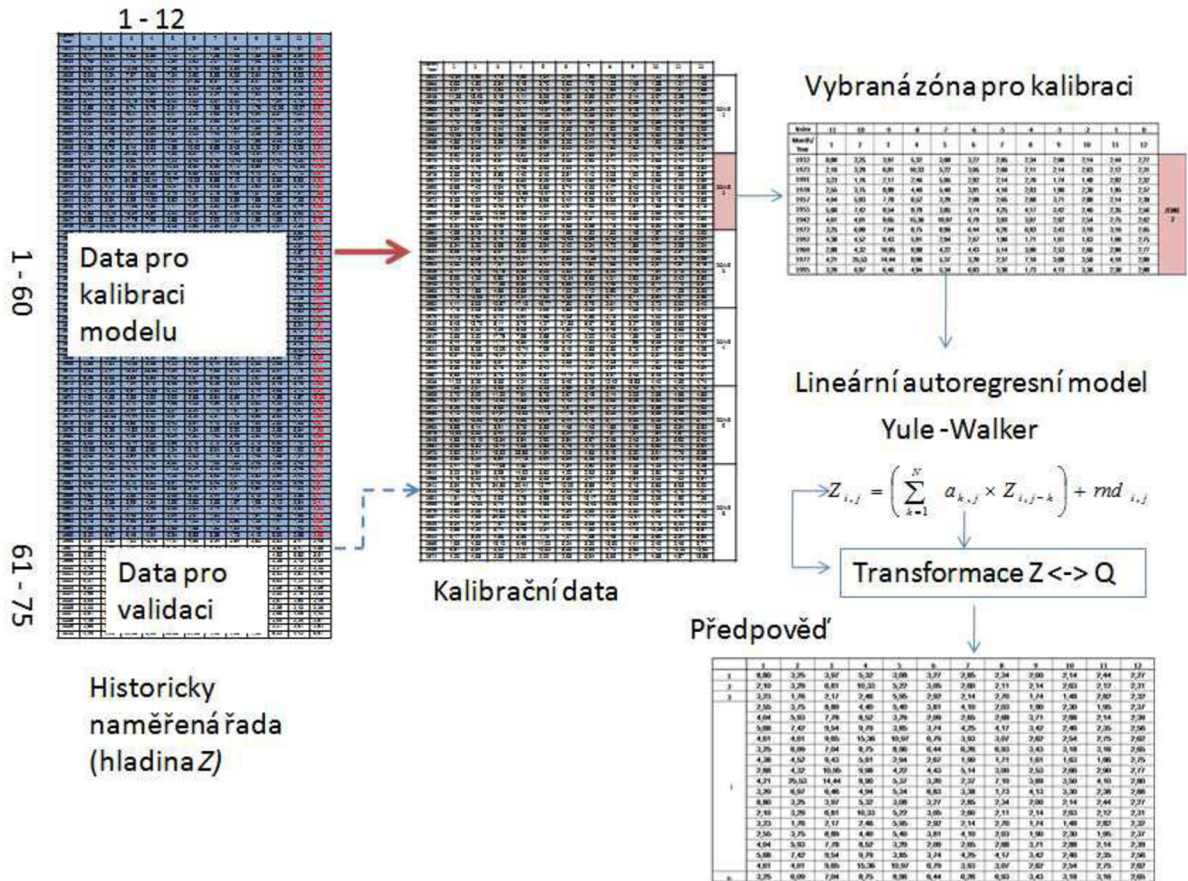
Základní rovnice lineárního autoregresního modelu:

$$Z_{i,j} = a_1 \cdot Z_{i,j-1} + a_2 \cdot Z_{i,j-2} + a_3 \cdot Z_{i,j-3} + \dots + a_k \cdot Z_{i,j-k} + rnd_{i,j}, \quad [13] \quad (3)$$

kde  $a_1$  až  $a_k$  jsou regresní koeficienty,  $Z_{i,j-1}$  až  $Z_{i,j-k}$  jsou předchozí hodnoty průměrných měsíčních průtoků transformované na hladinu  $Z$ ,  $rnd_{i,j}$  je náhodné číslo generované z normovaného normálního rozdělení,  $j$  je pořadí měsíce (pokud předpovědi přímo navazují na reálnou řadu a  $Z_{i,j-1}$  až  $Z_{i,j-k}$  jsou posledními členy reálné průtokové řady transformované na hladinu  $Z$ ) a  $i$  je číslo vydávané předpovědi Yule-Walkerovi rovnice.

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho(1) & \dots & \rho(k-2) & \rho(k-1) \\ \rho(1) & 1 & \rho(1) & \dots & \rho(k-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(1) & \dots & \rho(1) & 1 & \rho(1) \\ \rho(k-1) & \rho(k-2) & \dots & \rho(1) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_{k-1} \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho(1) \\ \rho(2) \\ \dots \\ \rho(k-1) \\ \rho(k) \end{pmatrix}, \quad [13] \quad (4)$$

kde  $a_1$  až  $a_k$  jsou hledané regresní koeficienty a  $\rho(1)$  až  $\rho(k)$  jsou příslušné korelační koeficienty.



Obr. 2 Schéma modifikovaného zonálního modelu [13]

### 3.1.3 Metody umělé inteligence

#### Neuronové sítě

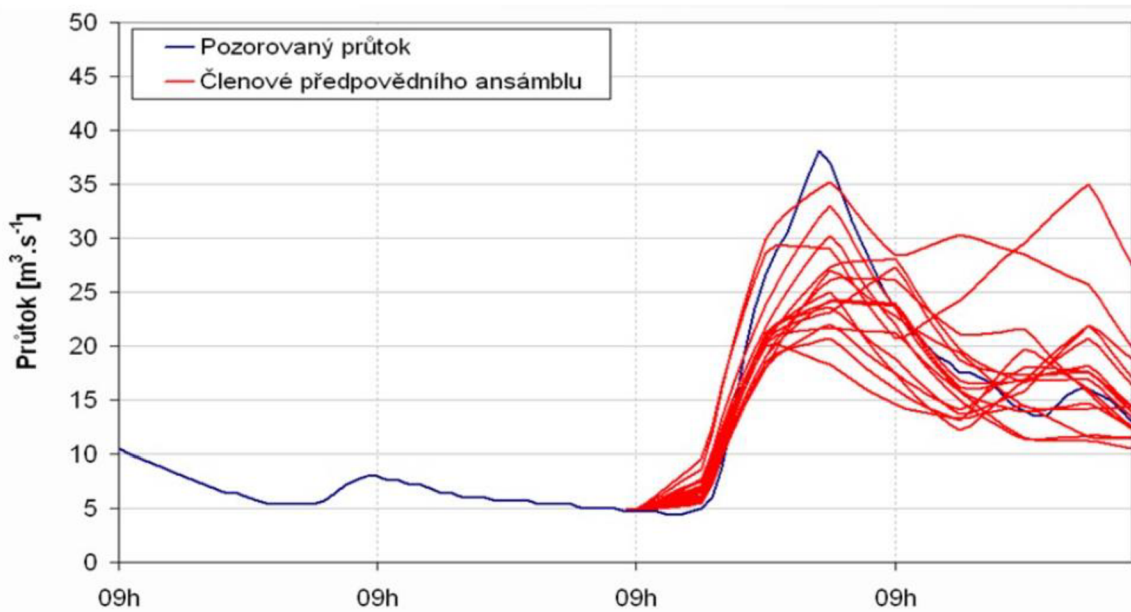
Další metodou pro predikci průtoků, která stojí za zmínku, je metoda neuronových sítí. Umělé neuronové sítě (dále jen neuronové sítě – NS) dominují v rozpoznávání okamžité závislosti ze vzorů vstupně výstupních vztahů. Tím jsou odlišné od expertních systémů, které dosahují kvalitních výsledků v posloupnosti logických operací a fuzzy logických metod, jež se vyznačují schopností reprezentovat a představovat znalosti. První informace o NS bývá spojována se jmény McCullocha & Pittse (1943), kteří sestavili první neuronový model. V roce 1949 navrhl Donald Hebb ve své knize Organization of Behaviour model, založený na biologické podobnosti, který je schopný učení.

Na popsaných principech je založena řada moderních učících se síťových mechanismů. Dominantní postavou 50. let se v oblasti NS stal Frank Rosenblatt. Vyvinul třídu neuronů nazývaných „Perceptrony“. Jeho přístup výrazně posunul vpřed teorii založenou na rozpoznávání vzorů a na asociativním učení [5].

### 3.1.4 Stochastický model

Stochastický model je nástroj pro odhad rozdělení pravděpodobnosti potenciálních výstupů tím, že umožňuje náhodnou změnu jednoho nebo více vstupů závislých na čase. Náhodná změna je obvykle založena na fluktuacích pozorovaných v historických datech za vybrané období pomocí standardní techniky časových řad [5].

Pro zpracování této práce se využívá stochastický model právě pro jeho práci s náhodnými proměnnými, mezi které se řadí například průtoky v měrných profilech. Výsledkem stochastických modelů mohou být mimo jiné třeba návrhy (předpovědi) průtoků, nebo generování průtokových či srážkových řad [6].



Obr. 3 Příklad stochastického předpovědního modelu z ČHMÚ

Příklad grafu stochastických pravděpodobnostních předpovědí z ČHMÚ.

### 3.1.5 Předpovědní modely využívané v hydrologii

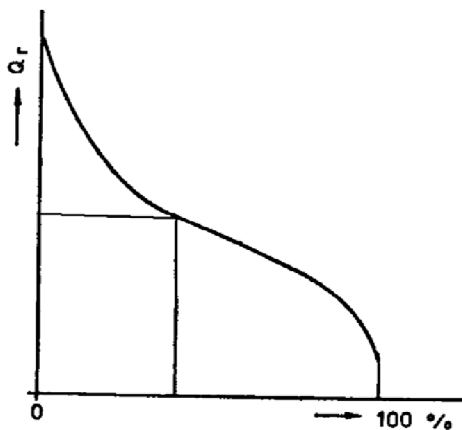
#### Model absolutně náhodné posloupnosti

Jedná se o jeden z nejzákladnějších a nejjednodušších modelů náhodné posloupnosti. Je určen pouze statickými parametry a rozložením pravděpodobnosti. Autokorelační funkce je nulová. Model například umí v jednoduchém tvaru určit průměrné roční průtoky [7].

$$Q_r = P(\varepsilon_r) \quad [7] \quad (5)$$

$\varepsilon_r$  bílý šum s jedničkovým rozptylem a nulovou střední hodnotou.

Principem konstrukce tohoto modelu je sestavení teoretické čáry překročení pro vypočítané statické parametry. Z vytvořené čáry překročení se dále odečítají její pořadnice v pořadí podle pseudonáhodných čísel. Poté díky nezávislosti na autokorelační funkci stačí odhadnout parametry rozložení pravděpodobnosti. Tento poznatek lze využít v metodách hydrologické analogie, kde pro měrný profil s nedostatkem pozorování není třeba zkoumat chronologický průběh reálné průtokové řady [7].



Obr. 4 Stanovení  $Q_r$  z čáry překročení průtoků [7]

#### Lineární regresní stochastické modely

Při tvorbě lineárních stochastických modelů je primárním krokem transformace vstupních veličin (průtoků) na veličiny s normálním rozdělením – vytvoří se posloupnost se všemi danými korelačními vztahy, ale s normálním rozdělením. Jednou

z možností je například logaritmicko-normální transformace, která převádí rozdělení náhodných veličin  $x$  na normální [7].

$$z = \frac{y - \mu(y)}{\sigma_y} \quad [7] \quad (6)$$

$\mu(y)$  střední hodnota,

$\sigma_y$  směrodatná odchylka,

$Z$  průměrný měsíční průtok transformovaný na normované normální rozdělení.

$$y = \ln(x - x_0) \quad (7)$$

Hlavní regresní rovnice a její popis:

Princip regresní analýzy nejdříve popíšeme na jednoduchém modelu dvou náhodných veličin  $X$  a  $Y$ , kde  $Y$  bude vysvětlovaná proměnná a  $X$  bude vysvětlující proměnná (regresor). Budeme předpokládat, že mezi vysvětlovanou proměnnou  $Y$  a vysvětlující proměnnou  $X$  platí přibližně lineární vztah. Měření nebo pozorování veličiny  $Y$  může být zatíženo náhodnou chybou  $e$  [8].

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + e \quad [8], \quad (8)$$

kde  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  jsou neznámé parametry (neznámé reálné konstanty),  $Y$  a  $e$  jsou náhodné veličiny a  $X$  je daná reálná proměnná. Dále předpokládáme, že při hodnotách  $x_1, x_2, \dots, x_n$  proměnné  $X$  pozorujeme hodnoty  $y_1, \dots, y_n$  proměnné  $Y$  zatížené chybami  $e_1, \dots, e_n$ . Pozorování vyhovují modelu [8],

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + e_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad [8]. \quad (9)$$

O chybách  $e_1, \dots, e_n$  předpokládáme, že jsou to nezávislé náhodné veličiny, že jsou nesystematické, tj. střední hodnota  $E(e_i) = 0$ , a homogenní, tj. že mají stejný rozptyl  $D(e_i) = \sigma^2$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Cílem je najít odhad parametrů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\sigma^2$ . Použijeme k tomu metodu nejmenších čtverců. Označíme:

$$S^2(\beta_1, \beta_2) = \sum_{i=1}^n X_i^2 + \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad [8] \quad (10)$$

$(y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_i))^2$  součet čtverců náhodných chyb  $e_i$  a odhady  $b \beta_1$ ,  $b \beta_2$  parametrů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  stanovíme tak, aby součet čtverců chyb  $S_2(\beta_1, \beta_2)$  nabyl minimální možné hodnoty [8].

### **Periodické modely (deterministický)**

Periodické modely jsou založeny na předpokladu, že je modelovaná řada tvořena směsí sinusových a kosinusových křivek s různými amplitudami a frekvencemi. Základem je znalost spektrální hustoty, pro kterou je hledán model s nejlepší shodou ve tvaru různých periodických složek. Za nejlepší odvození příslušného modelu se považuje přiblížení s minimálním reziduálním rozptylem [7].

### **Desagregační modely (deterministický)**

Desagregačními modely rozumíme modely, jež se zakládají na postupném rozkladu posloupnosti průměrných hodnot na posloupnosti s kratším časovým intervalem například na posloupnosti měsíčních či týdenních hodnot.

Modely vycházejí z posloupnosti reálných empirických hodnot podobně jako regresivní a periodické modely. Odlišností těchto modelů je řízení podle pravděpodobnostních vlastností jak pro nejkratší, tak i pro delší požadovaný interval [7].

### **Modely vycházející z Box Jenkinsonovy metodologie (stochastický)**

Metoda Box Jenkinsonovy metodologie vychází z korelační analýzy náhodných procesů a vytváří modely na základě autokorelačních vlastností náhodných veličin a vlastností jejich reziduální složky. Modely mají stochastický charakter.

Základem pro tyto modely je stacionární náhodná veličina  $y_t$  (s nulovou střední hodnotou) jako lineární kombinace hodnot bílého šumu  $\varepsilon_t$  v současném okamžiku  $t$  a v minulých okamžicích  $t-j$ .

$$y_t = \varepsilon_t + \Psi_1 \varepsilon_{t-1} + \Psi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots \quad [9] \quad (11)$$

$\Psi_t$  parametry,

$\varepsilon_t$  bílý šum.



Používány jsou taktéž zjednodušené případy obecného lineárního procesu, kde je volen závěrečný počet členů s nejmenším počtem parametrů. Příkladem takových stacionárních procesů mohou být modely MA (Moving Average), AR (Autoregressive), ARMA (Autoregressive Moving Average), ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) [9].

### **MA model (Moving Average) (stochastický)**

Model klouzavých součtů lze zapsat následovně:

$$y_t = \varepsilon_t + w_1\varepsilon_{t-1} + w_2\varepsilon_{t-2} + \dots + w_q \varepsilon_{t-q} \quad [9] \quad (12)$$

$w$  parametry modelu,

$\varepsilon_t$  bílý šum.

MA proces lze zapsat i pomocí zpětného posunutí následovně:

$$y_t = w(B)\varepsilon_t \quad [9] \quad (13)$$

$w$  parametry modelu,

$\varepsilon_t$  bílý šum.

Proces MA je stacionární pro jakoukoliv volbu jeho parametrů a jeho střední hodnota je nulová. Proces MA je invertibilní v případě, že veškeré kořeny polynomu  $w(B)$  leží mimo jednotkový kruh, ale v komplexní rovině.

### **AR model (Autoregressive) (stochastický)**

Tento model je založen na poznatku, že každá hodnota v časové řadě je závislá na minulých hodnotách dané řady. AR model může být zapsán následovně:

$$y_t = b_1y_{t-1} + b_2y_{t-2} + \dots + b_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad [10] \quad (14)$$

$b_1, b_2, \dots, b_p$  koeficienty autoregresního procesu,

$\varepsilon_t$  bílý šum,

$y_t$  nová hodnota řady vypočtená na základě předchozích hodnot.

AR proces lze zapsat také pomocí zpětného operátora:

$$b(B). y_t = \varepsilon_t \quad [10] \quad (15)$$

$b(B)$  autoregresní operátor.

### ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) (stochastický)

- integrovaný smíšený model.

Jedná se o nestacionární integrovaný model, kde „I“ znamená integraci. Daný model modeluje stochasticky jak náhodnou fluktuaci, tak i trendovou složku [10].

Definice modelu ARIMA:

$$b(B). vt = w(B). \varepsilon t$$

$$vt = \Delta d yt [10] \tag{16}$$

Dané modely nejsou v práci použity z důvodu přístupu dat.

### 3.2 Transformace historických dat

Práce s daty probíhala na úrovni průměrných měsíčních průtoků, kdy se roztřídila dle měsíce, ve kterém se daný průtok vyskytl. Každý měsíc v roce má jiné pravděpodobnostní rozdělení a jinou autokorelační funkci. Z toho důvodu by bylo generování průtokových řad problematické. Proto byl pro generování použit obvyklý postup, kdy se řady transformují na normované normální rozdělení  $N(0,1)$  – hladina  $Z$ . Tam proběhla jejich analýza a následné generování krátké umělé řady. Vygenerovaná řada se pak vrací inverzní transformací na původní rozdělení.

Transformace dat byla provedena ve dvou krocích. Prvním krokem bylo odstranění asymetrie dat – transformace na hladinu  $Y$ . V první fázi řešení byly použity různé typy logaritmických transformací, jejichž výsledky byly nepřesvědčivé. Proto bylo přistoupeno k odstranění asymetrie Cox-Boxovou rovnicí

$$Y_{i,j} = \frac{(Q_{i,j})^r - 1}{r} \tag{17}$$

kde  $Y_{i,j}$  je transformovaný průměrný měsíční průtok na rozdělení bez asymetrie,  $Q_{i,j}$  je průměrný měsíční průtok, který je transformován,  $r$  je koeficient transformace pro vybraný měsíc,  $j$  je pořadí měsíce (1–12, leden je 1 a prosinec je 12) a  $i$  je index průtoků.

Problémem při použití Cox-Boxovy 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). Dalším krokem byla samotná transformace členů průtokové řady z hladiny  $Y$  na hladinu  $Z$ , kde dosahují normovaného normálního rozdělení. Transformace proběhla za použití běžných transformačních vztahů

$$Z_{i-1,j} = \frac{Y_{i-1,j} - s_{j-1}}{x_{j-1}}$$

$$Y_{i,j} = x_j + s_j \cdot Z_{i,j} \quad [13] \quad (18)$$

kde  $Y_{i,j}$  je transformovaný průměrný měsíční průtok bez asymetrie,  $Z$  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) [13].

### 3.2.1 Normální rozdělení a normované normální rozdělení

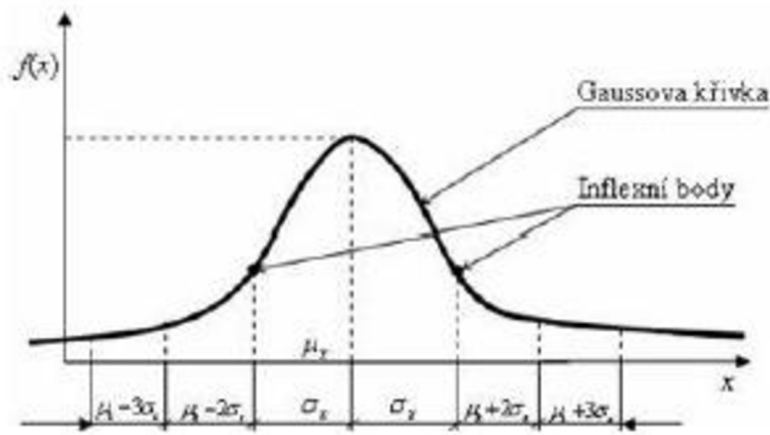
Normální rozdělení neboli rozdělení podle Gausse je jedno z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny. Jeho důležitost ukazuje centrální limitní věta, která tvrdí, že součet či aritmetický průměr velkého počtu libovolných, vzájemně nezávislých náhodných veličin, se vždy podobá normálně rozdělené náhodné veličině. Normální rozdělení proto za určitých podmínek dobře aproximuje řadu jiných pravděpodobnostních rozdělení, i když v praxi málokteré rozdělení je přesně normální [14].

Distribuční funkci normálního rozdělení náhodné veličiny určíme podle následujícího vztahu:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad [14] \quad (19)$$

Hustotu pravděpodobnosti normálního rozdělení náhodné veličiny určíme podle následujícího vztahu:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{\left[ -\frac{(x-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right]} \quad [14] \quad (20)$$



Obr. 5 Hustota pravděpodobnosti obecného normálního rozdělení [14]

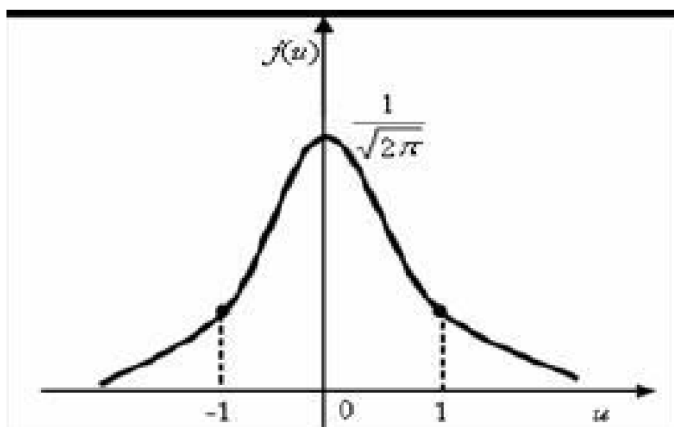
Rozdělení  $N(0, 1)$  bývá značeno jako normované normální rozdělení [14].

Distribuční funkci normovaného normálního rozdělení náhodné veličiny určíme podle vztahu následovně:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad [14] \quad (21)$$

Hustotu pravděpodobnosti normovaného normálního rozdělení náhodné veličiny určíme podle vztahu následovně:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad [15] \quad (22)$$



Obr. 6 Hustota pravděpodobnosti normovaného normálního rozdělení [14]

## 4 ČÁRY PŘEKROČENÍ

Čáry překročení – zcela zásadní pracovní nástroj v hydrologii.

Poskytuje informaci kolikrát nebo po jakou dobu byla určitá hodnota znaku v určitém období (např. pozorování) dosažena nebo překročena. Výsledkem zpracování čar překročení jsou mimo jiné návrhové veličiny pro projektování vodohospodářských a jiných staveb.

### Druhy čar překročení

Empirická čára překročení je založena na zpracování jednotlivých statistických souborů.

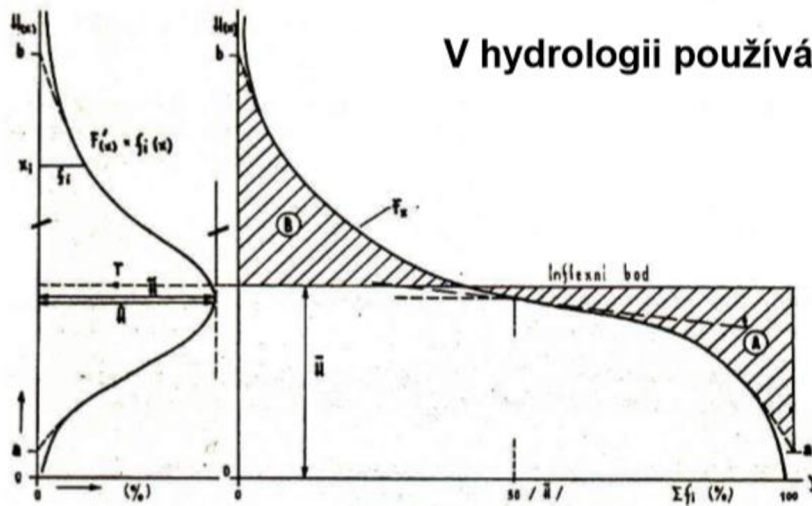
Teoretické čáry překročení – využívají se základní statistické charakteristiky souborů a zákony rozdělení pravděpodobnosti. Smyslem vyrovnaní průběhu ve střední části a extrapolace do oblasti extrémních hodnot [15].

V našem případě byla čára překročení vložena do zón výskytu. Výhodou je zjednodušení problematiky průtoku, která byla uvedena na začátku.

### 4.1 Možnosti zpracování teoretických čar překročení

Výpočet teoretické čáry překročení odpovídající určitému zákonu rozdělení pravděpodobnosti.

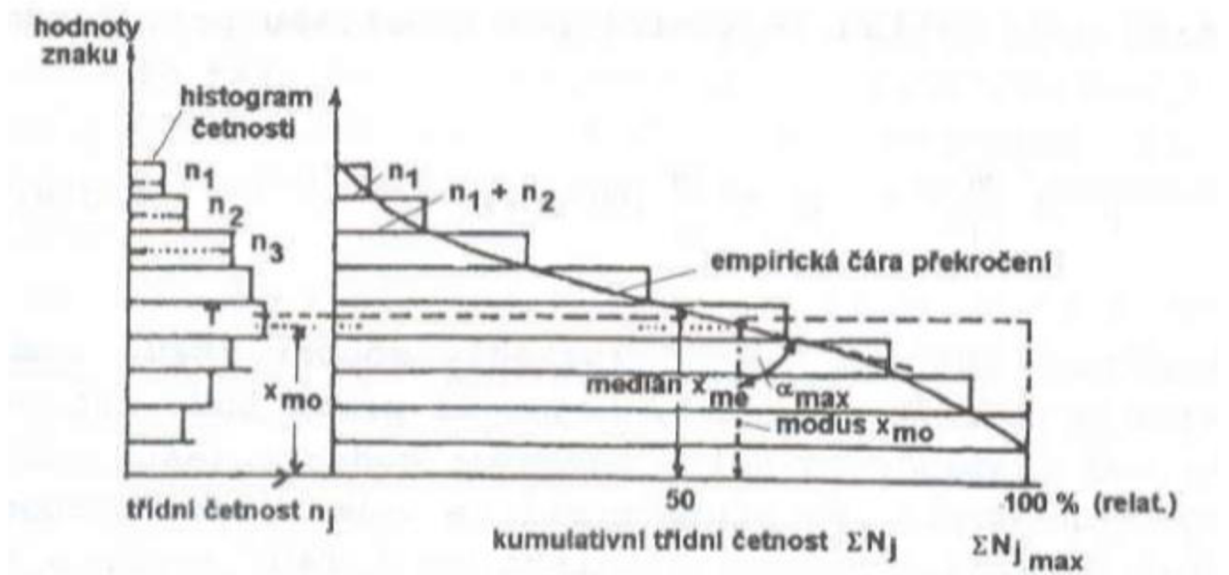
1. Zákon rozdělení Laplace-Gaussův – symetrické rozdělení pravděpodobnosti – neodpovídá však rozdělení hydrologických prvků – v hydrologii se skoro nepoužívá, jen výjimečně.
2. Zákon rozdělení Pearson III – průběh funkcí  $x$ ,  $C_s$  a  $C_v$  [15].



Obr. 7 Ukázka teoretické čáry překročení [15]

## 4.2 Možnosti zpracování empirických čar překročení

1. Pro rozsáhlé soubory se v minulosti používala metoda založená na rozdělení prvků statistického souboru do dílčích tříd nebo intervalů. Ty byly charakterizovány počtem výskytů pomůckou zvanou histogram četnosti. Čára překročení je potom součtovou čarou k histogramu četnosti [15].



Obr. 8 Ukázka empirické čáry překročení [15]

2. Na základě výpočtu pravděpodobnosti po seřazení souboru o n prvcích dle velikosti je m potom pořadové číslo prvku [15].

Základní rovnice:

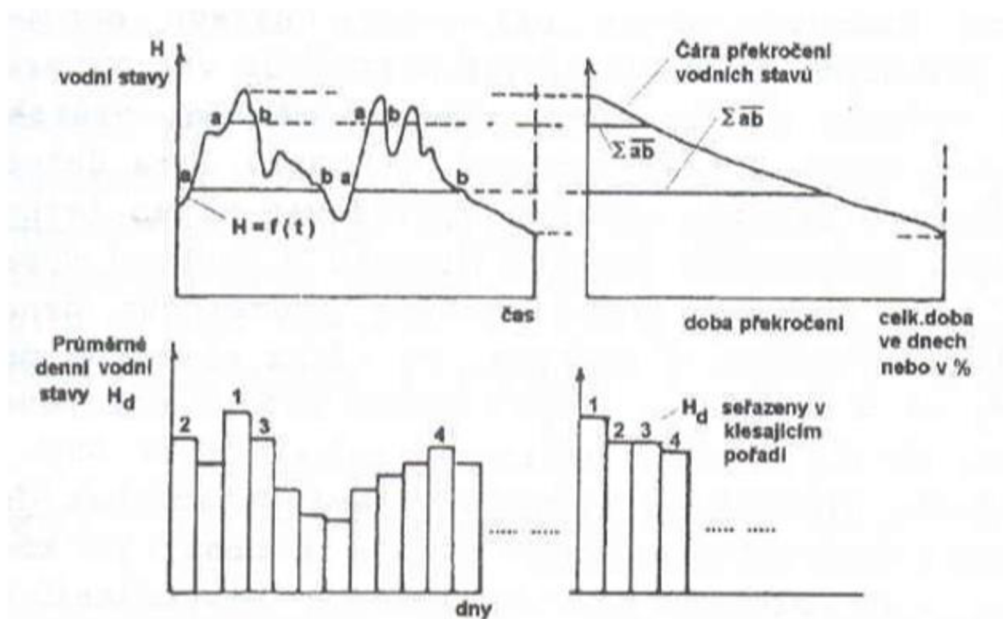
$$p = \frac{m}{n} \quad [15] \quad (23)$$

Čegodajev:

$$p = \frac{m - 0.3}{n + 0.4} \quad [15] \quad (24)$$

3. V případě spojitého průběhu čáry daného jevu (například hydrogram – závislost Q na t) součtem dob trvání pro různé velikosti posuzovaného jevu z čáry průběhu jevu [15].

4. V případě sloupcového zobrazení čáry jevu seřazením jednotlivých sloupců dle velikosti v klesajícím pořadí [15].

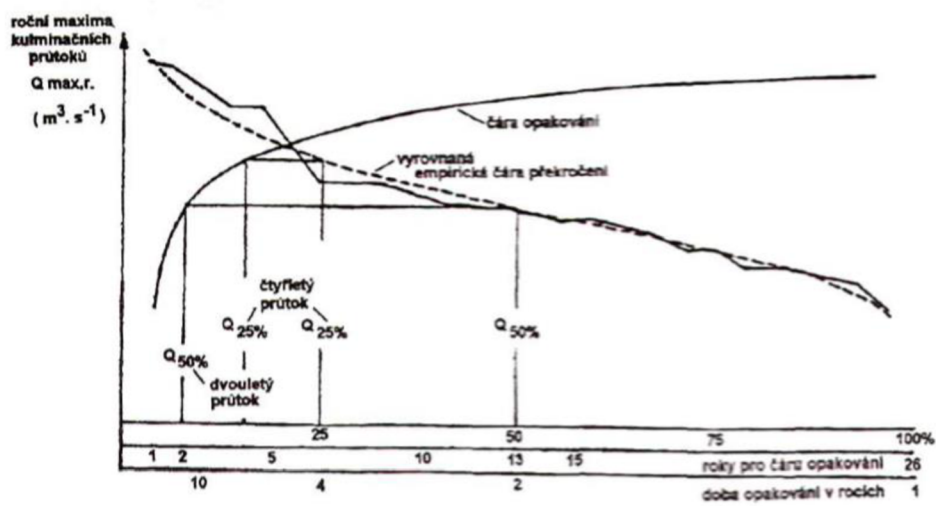


Obr. 9 Vodní stavy sestavy sloupcovými grafy podle pana Havlíka [15]



### 4.3 Čáry opakování

Vychází z čáry překročení a vyjadřují zákonitost růstu kulminačního průtoku s počtem období, ve kterém je tento průtok dosažen nebo překročen v průměru jednou [15].



Obr. 10 Čára opakování podle pana Havlíka [15]

## 5 SOFTWARE

V této kapitole jsou popsány programy, které byly k vytvoření práce využity.

### 5.1 Matlab

Je softwarový nástroj a interaktivní prostředí pro obory zabývající se například vizualizací, analýzou dat, návrhy řídicích systémů a různých predikcí. Kombinuje desktopové prostředí vyladěné pro iterační analýzu a návrhové procesy s programovacím jazykem, který vyjadřuje maticovou matematiku. První verze byla uvedena společností MathWorks v roce 1985. Výhodou prostředí Matlab je komunikace s programy, vytvořenými jinými programovacími jazyky. Tato schopnost je v moderní době velice využívána.

Dalším rodinným produktem je nadstavbová platforma *Simulink*, která slouží zejména k simulacím a modelování systému [16].

## 6 APLIKACE

### 6.1 Zájmová oblast

Pro naši práci jsme si vybrali průtoky z řeky Dyje, převážně z dostupnosti dat. Konkrétně z obce Podhradí nad Dyjí, která se rozprostírá západně od Vranova nad Dyjí. V sí protéká Křeslický potok a levou stranu říčního toku ohraničují Podhradské skály. Na jihu se vypíná zřícenina hradu Frejštejn. Rozloha vesnice je 6,17 km<sup>2</sup>, má 55 obyvatel (2019), její nadmořská výška je 368 m n. m. Obec leží v Jihomoravském kraji v okrese Znojmo.



Obr. 11 Umístění profilu v rámci České republiky (červená tečka značí umístění profilu) [20]



Obr. 12 Umístění profilu v rámci povodí Dyje (červená tečka značí umístění profilu) [21]

## 6.2 Řeka Dyje

Hydrologické pořadí: 4-14-02-001

Délka toku: 235,4 km česká část toku, 311 km rakouská část toku

Průměrný průtok: 44 m<sup>3</sup>/s

Řeka Dyje je díky své délce srovnatelná s řekou Moravou. V pramenné oblasti má Dyje dvě větve, rakouskou a moravskou. Rakouská Dyje (Deutsche Thaya) pramení u obce Schweiggeners v Dolním Rakousku. Ačkoli má delší tok, větší povodí i vodnost, u nás je uznávána za hlavní větev Moravská Dyje. Ta vyvěrá u obce Panenská Rozsídka (okres Jihlava) ve výšce 657 m n. m. S Rakouskou Dyjí se slévá na rakouském území u obce Raabs a do České republiky se vrací na říčním km 196,22 pod obcí Podhradí. V horní části toku Dyje byla vybudována přehradní nádrž Vranov, jedna z největších údolních nádrží v celém povodí Moravy. Dyje pak dále meandruje ve strmém a zalesněném údolí na území Národního parku Podyjí. Pod Znojmem se dostává do rovinatého Dyjskosvrateckého úvalu.

V této oblasti se v prostoru střední nádrže vodního díla Nové Mlýny do Dyje vlévají její největší přítoky, řeky Svratka (délka 168,49 km) a Jihlava. Dolní tok Dyje protéká Břeclaví. Pod Lanžhotem v nadmořské výšce cca 150 m n. m. se Dyje vlévá do Moravy na jejím říčním km 836,49. Jedná se o její pravostranný přítok. Celkový absolutní spád toku činí 506 m [17].

### Hlavní přítoky

- Jihlava s přítokem z levé strany toku na staničení ř. km 66,0.
- Svratka s přítokem z levé strany toku na staničení ř. km 66,0.
- Jevišovka s přítokem z levé strany toku na staničení ř. km 83,1.
- Želetavka s přítokem z levé strany toku na staničení ř. km 190,7.
- Kyjovka s přítokem z levé strany toku na staničení ř. km 8,0.



Obr. 13 Česká část řeky Dyje na mapě [22]

## Řeka Dyje [14]



Obr. 14 Kaňon řeky Dyje, národní park Podyjí [21]



Obr. 15 Rovinný úsek řeky Dyje přitékající do zájmového území

### **6.2.1 Nejvyšší body řeky**

Nejvyšším bodem povodí Dyje je s nadmořskou výškou 837 m n. m. Javoříce v Českomoravské vrchovině, známá také jako „Devět skal“.



Obr. 16 Javořice – nejvyšší bod na Dyji

## 6.2.2 Objekty v zájmovém území, ovlivňující průtoky



Obr. 17 Jez na začátku obce Podhradí nad Dyjí po dešti





Obr. 18 Jez na začátku obce Podhradí nad Dyjí před deštěm



Obr. 19 Jez v Podhradí nad Dyjí po dešti



Obr. 20 Jez na konci obce ovlivňující data z měrné stanice

### 6.3 Měrný profil

Dané údaje byly uvedeny z evidenčních listů povodňové služby Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) z lokality Podhradí nad Dyjí.

Stanice kategorie:	A
Tok a staničení:	Dyje, km 19,09
Obec s rozšířenou působností:	Znojmo
Obec:	Podhradí nad Dyjí
Provozovatel:	ČHMÚ Brno
Souřadnice:	15.691373 v.d., 48.903325 s.š.
SPA pro úsek toku:	Státní hranice – VD Vranov

<b>Stupně povodňové aktivity</b>	[cm]	[m <sup>3</sup> /s]
Ohrožení (III. stupeň):	280	166,0
Pohotovost (II. stupeň):	230	116,0
Bdělost (I. stupeň):	180	72,7

#### Nejvyšší zaznamenané stavy vodní hladiny

[cm]	V.–XI.	[cm]	XII.–IV.
490	12. 5. 1951	490	21. 3. 1947
476	14. 8. 2002	456	11. 3. 1941
377	18. 7. 1941	446	7. 4. 1944

**Průměrný roční stav** 70 cm

**Průměrný roční průtok** 8,81 m<sup>3</sup>/s

<b>N-leté průtoky</b>	Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
[m <sup>3</sup> /s]	97,8	157	196	320	390



Obr. 21 Měření hladiny nad 4 metry výšky



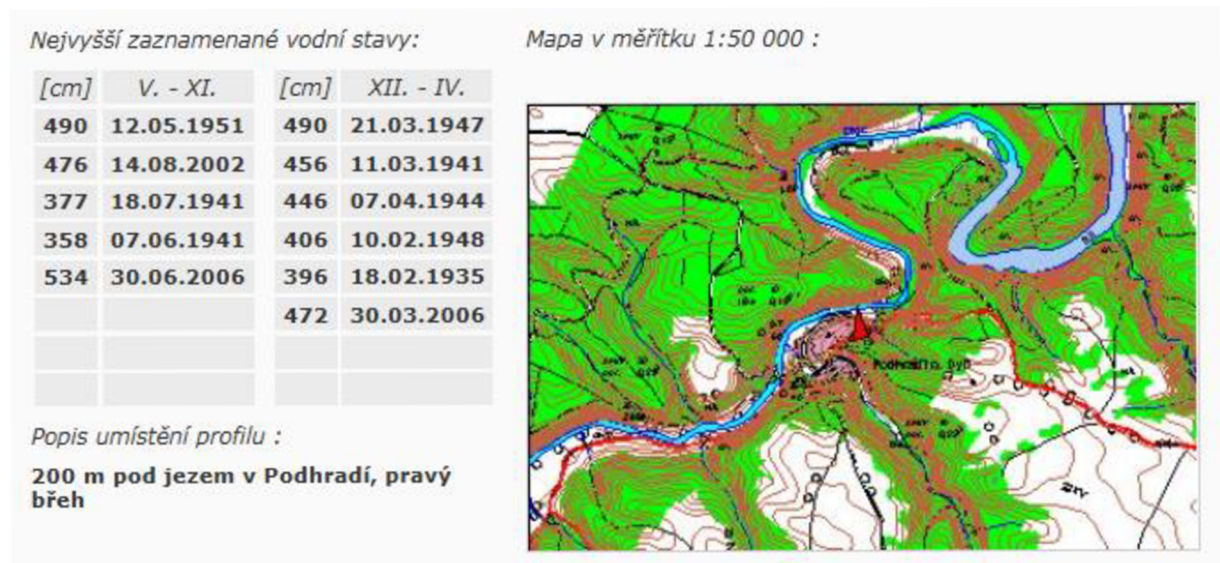
Obr. 22 Historické povodně



Obr. 23 Měření hladiny okolo 2–3 metrů výšky



Obr. 24 Měření hladiny okolo 1 metru výšky



Obr. 25 Nejvyšší zaznamenané vodní stavy hladiny z ČHMÚ

## 6.4 Vodní nádrž Vranov

### Základní údaje

Nádrž:	VD Vranov
Tok:	Dyje, km 175,41
Správce:	Povodí Moravy, s. p.
Závod:	Dyje
Účel:	Protipovodňová ochrana, rekreační účely, plavba

### Poloha

Kraj:	Jihomoravský
Okres:	Znojmo
Obec:	Vranov nad Dyjí
Katastrální území:	Vranov nad Dyjí





Obr. 26 Vodní nádrž Vranov [21]

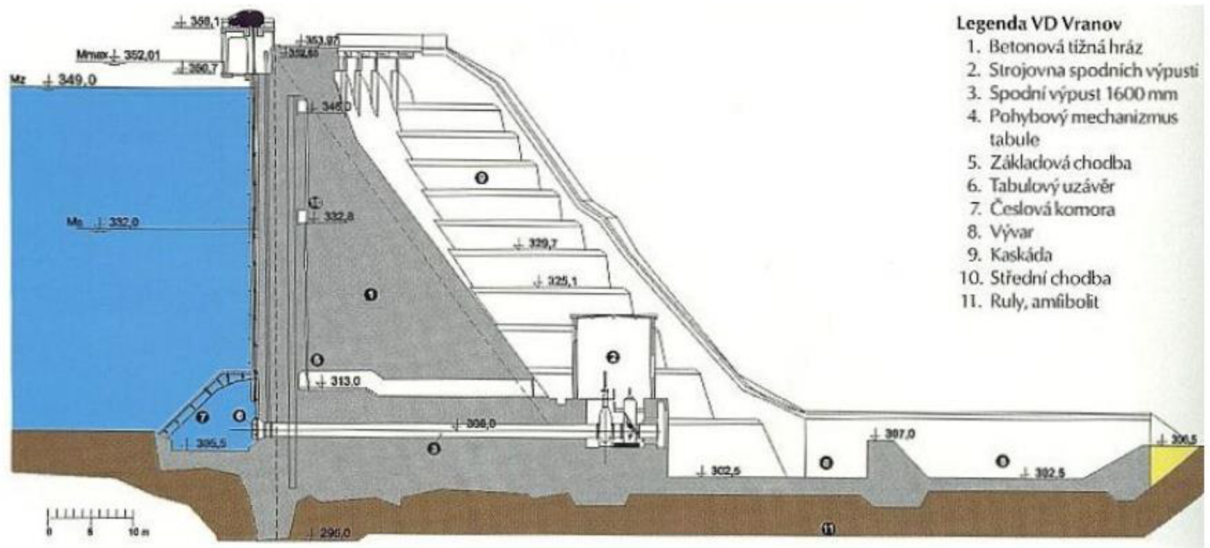
### 6.4.1 Vznik díla

Vranovská přehrada je špičkovým inženýrským stavebním dílem své doby, které slouží svému účelu bez újmy na zdraví obyvatelstva dodnes. Jejím postavením zároveň vzniklo velké a ještě přesněji – dlouhé jezero, které se klikatí na délce téměř 30 kilometrů bývalým kaňonem Dyje od Podhradí nad Dyjí až k Vranovu. Nutná zásobárna vody a zdroj elektrického proudu pro celý region dala současně vzniknout jedné z nejvyhledávanějších rekreačních lokalit této země, a to v jejím nejteplejším koutě. Jedná se o Moravský Jadran [18].

Kromě toho v době její stavby dávala práci asi 3000 obyvatel z přílehlého okolí, a to v období, kdy jí byl pro hospodářské poměry země nedostatek. I když je těleso přehrady zaklesnuto na obou stranách do skalního masivu, nejde o přehradu klenbovou, ale gravitační, která zadržuje vody Dyje vlastní vahou. Materiál na stavbu se dopravoval po speciálně k tomu vybudované úzkokolejné dráze, jejíž stopy lze dodnes vysledovat [18].

Modrý kámen se těžil v lomu v dnešní Švýcarské zátoce a plastický beton se přivážel po úzkokolejce až z obce Šumná, kde je přístupová železniční stanice. Kvalitu tohoto díla prověřila nedávná měření. Opotřebením betonu na vodní i vzdušné straně je jen povrchové, průsaky vody v řádu desetin litrů za sekundu a těleso přehrady nevykazuje žádná poškození, takže obyvatelé Vranova mohou klidně spát. Přitom je zajímavé vědět, že hráz podléhá pohybům v důsledku tlaku vody, ale také vlivem slunečního svitu na vzdušnou část tělesa. Tyto řádově milimetrové odchylky měří tzv. hrázové

kyvadlo v olejové lázni, umístěné uvnitř hráze [18]. O výrobu elektrické energie se starají 3 Francisovy turbíny s průtokem  $3 \times 15 \text{ m}^3/\text{sec}$ , každá o výkonu 5400 kW, čtyři základové výpustě o průměru 160 cm mají kapacitu  $165 \text{ m}^3/\text{sec}$ , a pokud dojde k naplnění jezera a přepadu vody, umožní 9 přepadových otvorů průtok  $405 \text{ m}^3/\text{sec}$  [18].



Obr. 27 Vodní elektrárna Vranov nad Dyjí [19]

Za přehradou vytvořily Dyje s Želetavkou jezero o délce téměř 30 km, sahající za plného stavu až k hotelu Zátíší v Podhradí nad Dyjí. Na celé délce vznikem tohoto díla zanikla jediná obec – Bítov (viz str. obce regionu-historie) [18].

Závěrem jen tolik, že účel, pro který bylo toto dílo vybudováno, plní spolehlivě dodnes a bude nepochybně plnit i pro další generace [18].

### Vranovská přehrada – Jak vzniklo toto dílo

Zajímavostí také je, že na Vranovské přehradě se u nás provádělo první systematické měření deformace hráze a poprvé zde bylo zjištěno, že se některé bloky hráze ve své horní části pohybovaly nejen ve směru toku vlivem zatížení vodou, ale dokonce i proti vodě vlivem oslunění a ohřátí. Nejprve bylo toto zjištění odborníky popíráno, ale později bylo prokázáno i na jiných stavbách v zahraničí. Vranovská přehrada ukázala, že příznivě ovlivňuje povodňové průtoky [19].

Extrémní zkouškou prošla v srpnu 2002, kdy kulminační průtok na přítoku dosáhl velikosti 430 m<sup>3</sup>/s a maximální odtok vody činil 364 m<sup>3</sup>/s. Tím, že došlo ke snížení odtoku této vody při povodni, bylo sníženo riziko velkých škod na Dyji i ve Znojmě [19].



Obr. 28 Vodní hráz Vranov [19]



Obr. 29 Stínový reliéf nížin a hor vodní nádrže Vranov [19]

## 7 PRÁCE S DATY (KALIBRACE A VALIDACE)

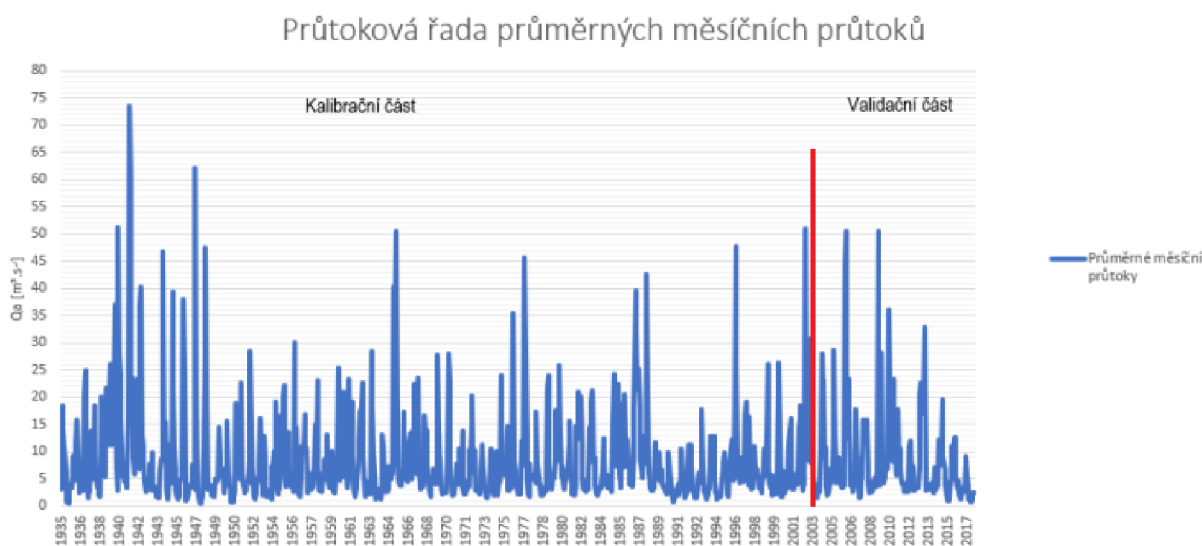
K sestavení a následné validaci byla použita data z Českého hydrometeorologického ústavu – ČHMÚ, konkrétně z měrné stanice Podhradí nad Dyjí, km 19. 09, kterou má na starost brněnský ústav. Nedaleko od místa měření se nachází Vranovská přehrada, jež je přítokem Dyje značně ovlivněna a naopak přehradou je ovlivněn přirozený průběh řady.

Danou reálnou průtokovou řadu jsme si vybrali z důvodu její délky a přístupnosti dat. Řada se skládá z 83 let záznamů průměrných měsíčních průtoků (od roku 1935 do roku 2017). Prvních 69 let bylo použito pro kalibraci modelu a posledních 14 let jsme použili pro validaci. Kalibrace byla ovlivněna vzduším, ale to je opraveno přímo v datech.

Průtoky měly v každém měsíci jiné pravděpodobnostní rozdělení, proto se data transformovala na normované normální rozdělení neboli jednotné. Dané rozdělení jsme rozebírali v kapitole 3.2.1.

Závěrem byla využita validační část průtoků pro vyhodnocení výpočtového modelu. Srovnání výsledků daného modelu s hodnotami skutečnými bylo cílem práce. Právě dané odchylky a jejich velikosti byly rozhodující pro naši přesnost modelu. Čím menší odchylka nastane, tím je model přesnější a naopak.

Na obrázku 30 můžeme vidět rozdělení dat na kalibrační a validační část.



Obr. 30 Reálná průtoková řada

## 7.1 Aplikace modelu a vyhodnocení výsledků

Další práce můžeme rozdělit na dvě části. V první části byla řešena data, jejich vyžádání a zpracování. Zpracována byla v aplikaci Excel a následně se načetla do aplikace Matlab. Zde proběhla transformace, viz Box Jenkins, kapitola 3.1.5., vygenerování optimální délky vstupní matice a celkovým zautomatizováním jednotlivých kroků postupu. Dále se zkoušelo operovat s modelem a určit optimální počet zón. Následně se tedy predikovaná data vyexportovala do výstupního souboru, kde jsou následně zálohována. Tento krok se v daném případě provedl několikrát, a to pro každou další zónu zvlášť.

V druhé části stanovíme predikované hodnoty pomocí kvantilů, které se odečítaly z empirické čáry překročení, viz Čegodajev 4. 2., a následně můžeme odečítat nejmenší odchylku pro daný měsíc a pořadí (číslo) kvantilů, ve kterém se hodnota nachází.

Následující tabulka nám zobrazuje výsledné odchylky (kvadrát průměrné odchylky za validační období) v 1. zóně, kde můžeme vidět v prvním sloupečku dané pořadí a v prvním řádku měsíce, do kterých jsou zařazeny odchylky průtoku. V dané práci byl každý měsíc vytvořen a vyhodnocen zvlášť. Uvedené hodnoty platí pro 1. předpovídaný měsíc, protože na něj mají okolnosti největší dopad.

Tab. 1 Vyhodnocení výsledků zóny 1

ZÓNA 1	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
1	10.073	9.947	10.460	12.547	13.340	13.620	14.353	14.540	14.653	14.687	14.747	14.900
2	8.633	8.387	8.633	8.793	8.927	9.060	9.620	9.640	9.647	9.647	9.653	9.660
3	7.860	7.600	7.833	7.940	8.033	8.167	8.693	8.707	8.713	8.707	8.713	8.713
4	7.493	7.240	7.420	7.533	7.613	7.740	8.260	8.273	8.273	8.273	8.273	8.273
5	7.107	6.853	7.047	7.120	7.193	7.313	7.853	7.833	11.433	7.833	7.833	7.833
6	6.640	6.393	6.547	6.620	6.687	6.807	7.300	7.313	7.313	7.313	7.313	7.313
7	6.260	6.020	6.153	6.247	6.280	6.427	6.913	6.920	6.927	6.920	6.920	6.920
8	5.967	5.727	5.860	5.933	6.007	6.107	6.587	6.593	6.593	6.593	6.593	6.593
9	5.673	5.440	5.560	5.640	5.700	5.807	6.280	6.287	6.287	6.287	6.287	6.287
10	5.247	5.013	5.127	5.220	5.240	5.333	5.787	5.793	5.793	5.787	5.787	5.793
11	4.807	4.593	4.693	4.693	4.707	4.800	5.260	5.260	5.260	5.260	5.260	5.260
12	4.547	4.333	4.413	4.400	4.400	4.487	4.900	4.900	4.900	4.893	4.893	4.893
13	4.303	4.100	4.160	4.133	4.120	4.187	4.593	4.593	4.587	4.587	4.587	4.587
14	4.153	396.340	4.013	3.980	3.953	4.020	4.400	4.393	4.393	4.387	4.393	4.387
15	4.069	3.880	3.873	3.827	3.787	3.833	4.167	4.153	4.153	4.147	4.153	4.147
16	4.207	4.033	4.013	3.460	3.853	3.880	4.173	4.160	4.160	4.153	4.160	4.153
17	4.260	4.520	4.460	4.367	4.240	4.247	4.460	4.440	4.427	4.220	4.420	4.420
18	5.633	5.513	5.447	5.347	5.200	5.160	5.267	5.240	5.233	5.227	5.227	5.220
19	8.673	0.853	8.473	8.293	0.807	8.000	8.020	7.973	7.960	7.947	7.953	7.460
20	21.267	2.120	20.920	20.667	20.247	20.093	19.880	19.807	19.787	19.767	19.767	19.760
21	121.220	121.413	120.920	120.440	119.660	119.247	117.607	117.453	117.340	117.307	117.300	117.293

V daném nastavení vyšly nejmenší odchylky a zároveň nejlepší výsledky v každém měsíci shodně, a to pro pořadové číslo 15. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v období od února do června, konkrétně v květnu, kdy odchylka dosáhla velikosti 3.787, což přibližně odpovídá průměrné hodnotě průtoku a kvantilu 0.75.

Tab. 2 Vyhodnocení výsledků zóny 2

ZÓNA 2	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
1	10.060	9.937	10.333	12.441	13.194	13.584	14.625	14.730	15.059	15.029	15.101	15.447
2	9.210	8.973	9.152	9.131	9.458	9.710	10.117	10.123	10.058	10.042	10.013	9.892
3	8.643	8.388	8.313	8.481	8.755	8.782	9.347	8.983	9.173	9.073	8.798	8.806
4	8.115	7.787	7.713	7.949	8.191	8.038	8.613	8.498	8.505	8.391	8.366	8.344
5	7.865	7.541	7.349	7.470	7.654	7.751	8.194	8.035	8.044	7.967	7.924	7.969
6	7.713	7.303	6.893	7.042	7.409	7.281	7.764	7.707	7.758	7.615	7.614	7.608
7	7.504	7.061	6.634	6.706	6.912	6.821	7.451	7.278	7.329	6.965	7.291	7.150
8	7.249	6.715	6.345	6.407	6.553	6.584	7.000	6.991	6.910	6.552	6.846	6.838
9	7.116	6.463	5.961	6.088	6.228	6.319	6.621	6.504	6.554	6.280	6.542	6.498
10	6.846	5.976	5.501	5.757	5.837	5.991	6.294	5.937	6.334	5.973	6.154	6.083
11	6.651	5.608	5.235	5.380	5.404	5.583	5.699	5.707	5.730	5.228	5.744	5.570
12	6.444	5.034	4.696	5.012	5.074	5.367	5.525	5.191	5.148	4.833	5.104	4.963
13	6.279	4.840	4.490	4.387	4.762	4.934	4.850	4.794	4.818	4.599	4.695	4.782
14	6.154	4.485	4.073	4.216	4.169	4.322	4.530	4.569	4.593	4.471	4.555	4.557
15	5.986	4.322	3.973	3.945	4.002	4.047	4.344	4.357	4.430	4.308	4.398	4.408
16	5.878	4.303	4.125	3.897	4.059	3.928	4.227	4.287	4.254	4.263	4.415	4.247
17	5.688	4.511	4.327	4.049	4.218	4.184	4.247	4.338	4.553	4.433	4.706	4.331
18	5.449	5.165	4.779	4.439	4.681	4.931	4.742	4.823	5.319	5.072	5.443	5.057
19	5.276	6.379	8.030	6.352	5.791	8.717	8.607	6.873	6.579	7.399	6.741	6.209
20	5.124	10.177	19.753	16.652	17.285	19.982	15.958	16.458	21.412	19.946	16.484	14.904
21	4.745	61.181	94.083	105.859	99.071	50.328	74.921	61.520	49.582	76.744	84.456	62.011

V zóně 2 je evidentní rozdíl proti předchozí zóně číslo 1, kdy se nejmenší odchylka v lednu nachází až v pořadovém čísle 21. Následně se hodnoty po letní měsíce střídají mezi 15. a 16. pořadovým číslem. Letní měsíce náleží pro 16. pořadové číslo až do listopadu, kde se opět začíná odchylka střídát s 15. pořadovým číslem. Nejlepší výsledky byly dosaženy mezi březnem a červnem, konkrétně v dubnu s hodnotou 3.897. Zde opět hodnota kvantilu odpovídá přibližně průměrnému průtoku, a to 0.75.

Tab. 3 Vyhodnocení výsledků zóny 3

ZÓNA 3	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
1	10.060	9.923	10.626	12.783	13.310	13.699	14.566	14.968	14.754	15.218	15.882	15.381
2	9.431	9.259	9.283	9.444	9.743	10.057	10.645	10.659	10.902	10.666	10.342	10.645
3	9.001	8.581	8.737	8.721	9.096	9.060	9.440	9.226	8.873	9.356	9.138	9.263
4	8.648	8.069	8.017	8.032	8.317	8.347	8.931	8.486	8.297	8.467	8.491	8.469
5	8.265	7.716	7.357	7.551	7.793	7.777	8.341	8.038	8.053	7.998	8.052	8.163
6	8.026	7.447	6.939	7.130	7.360	7.495	7.964	7.749	7.560	7.528	7.707	7.884
7	7.871	7.054	6.724	6.683	6.990	6.963	7.533	7.465	7.176	6.921	7.396	7.542
8	7.782	6.546	6.466	6.391	6.612	6.622	7.104	7.180	6.827	6.543	6.931	7.111
9	7.656	6.128	5.924	6.076	6.389	6.434	6.782	6.865	6.459	6.245	6.542	6.772
10	7.512	5.633	5.490	5.913	6.016	5.815	6.413	6.283	5.962	5.812	6.105	6.483
11	7.320	5.318	5.246	5.561	5.727	5.523	5.981	5.956	5.487	5.358	5.738	6.138
12	7.213	5.168	4.760	5.296	5.312	5.306	5.748	5.321	5.178	4.964	5.077	5.283
13	7.124	4.790	4.406	4.981	5.089	4.963	5.519	4.920	4.813	4.777	4.732	4.718
14	7.001	4.666	4.153	4.386	4.654	4.325	5.141	4.754	4.732	4.651	4.557	4.575
15	6.774	4.505	4.068	4.167	4.233	4.087	4.595	4.655	4.677	4.583	4.478	4.416
16	6.658	4.878	4.204	4.105	4.095	3.958	4.578	4.620	4.829	4.563	4.507	4.207
17	6.556	5.191	4.310	4.163	4.399	4.159	4.685	4.895	4.933	4.598	4.750	4.350
18	6.409	6.004	4.936	4.609	4.705	5.172	5.770	5.595	6.071	5.081	5.588	5.081
19	6.294	8.321	10.290	7.106	9.926	9.160	10.736	9.261	10.012	6.858	7.603	7.205
20	6.186	12.337	19.302	17.568	17.016	15.498	17.960	16.962	24.061	21.949	15.242	17.469
21	6.168	63.095	48.025	124.999	81.120	52.514	42.501	36.946	46.673	53.562	53.435	75.082

Ve výše zmíněné 3. zóně je opět možno vidět shodu pro měsíc leden, kde odchylka náleží 21. pořadovému číslu a následně se opět odchylky střídají v 15. a 16. pořadovém čísle. Ve 3. zóně byly výsledky poměrně vyrovnané a nejlepší hodnoty odchylky dosáhl měsíc červen. Dané hodnoty opět náleží kvantilu 0.75.

Následně byla data porovnána v dalších třech zónách a byla vytvořena souhrnná tabulka všech nejlepších hodnot pro dané nastavení 12 měsíců zařazených do 6 zón výskytu.

Tab. 4 Souhrnná tabulka všech nejlépe dosažených výsledků

	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
ZÓNA 1	4.069	3.880	3.873	3.827	3.787	3.833	4.167	4.153	4.153	4.147	4.153	4.147
ZÓNA 2	4.745	4.303	3.973	3.897	4.002	3.928	4.227	4.287	4.254	4.263	4.398	4.247
ZÓNA 3	6.168	4.505	4.068	4.105	4.095	3.958	4.578	4.620	4.677	4.563	4.478	4.207
ZÓNA 4	6.628	4.659	4.158	4.372	4.015	4.096	4.577	4.796	4.672	4.674	4.758	4.225
ZÓNA 5	7.120	4.549	4.112	4.583	3.998	4.018	4.604	5.629	4.933	4.890	4.658	4.180
ZÓNA 6	7.451	4.870	3.951	4.384	3.850	4.267	4.910	5.659	4.977	4.542	4.646	4.236

Při porovnání výsledných dat je z červených výsledků zřejmé, že můžeme jasně konstatovat, které z daných nastavení vychází s nejmenšími chybami, a zároveň je tedy nejlepší. Pro každý měsíc v roce byla nejpříznivějším nastavením zóna číslo 1. Dále zjišťujeme, že každá další zóna následující po zóně 1 měla rostoucí tendenci ve velikosti odchylek a také zvětšující se počet nejhorších výsledků, které jsou zaznamenány modrou barvou.

Po vyhodnocení kvantilů bylo zjištěno, že nejlepší výsledky platily pro kvantil 0.75, který se velice blíží průměrnému průtoku.

V dalším kroku bylo provedeno řízení skrz zásobní funkci nádrže a díky výsledkům nedostačujícím na suchou prognózu bylo přistoupeno k modifikaci.

Zde se zjistilo, že když se hodnoty kvantilu přiblížily k 0.9, sucho již pokračovalo.

Stanovení zní, že nastavený model bude ideální v případě sucha, kdy budou nižší průtoky, v případě vyšších průtoků nám ale bude dělat problém.

Další modifikací bylo vyzkoušeno vyřazení vyšších povodňových průtoků a bylo dosaženo lepších výsledků, a to ideálně kombinací kvantilů 0.95 a 0.75.

Tab. 5 Výsledky po modifikaci průtoků

	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
ZÓNA 1	2.841	2.763	2.761	2.752	2.345	2.389	2.397	2.375	2.358	2.326	2.471	2.961
ZÓNA 2	2.958	2.875	2.802	2.105	2.389	2.396	2.485	2.352	2.391	2.387	2.593	2.865
ZÓNA 3	3.342	2.924	2.843	2.372	2.489	2.403	2.561	2.407	2.416	2.357	2.582	3.262
ZÓNA 4	3.358	2.987	2.912	2.632	2.542	2.418	2.578	2.587	2.524	2.581	2.592	3.385
ZÓNA 5	3.402	3.152	2.932	2.784	2.358	2.697	2.599	3.156	2.556	2.679	3.154	3.234
ZÓNA 6	3.415	3.187	2.865	2.762	2.351	2.874	2.654	3.098	2.631	2.613	3.234	3.015



## 8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla konstrukce předpovědního modelu pro průměrný měsíční průtok v daném měrném profilu v zájmovém území Podhradí nad Dyjí. Celá konstrukce modelu byla vytvořena a zprogramována v softwaru Matlab a převedena do Microsoft Excel, kde byla data vyhodnocena.

Předpovědní model byl sestaven na předpověď průtoku na jeden měsíc dopředu. Každý měsíc byl sestaven a vyhodnocen zvlášť. Dále byla data transformována do normálního rozdělení a následně rozřezána do zón výskytu. Už při rozdělení dat do zón se zjistilo, že při tomto postupu a sestavení čáry překročení dosahujeme horších výsledků na základě zvoleného kritéria. Data byla odečtena z empirické čáry překročení pomocí zvolených kvantilů. Vyhodnocovací kritérium znázorňuje kvadrát průměrné odchylky mezi skutečným průtokem a předpovídanou hodnotou za validační část. Následně byl měněn počet zón. Z výsledků vyplynulo, že nejlepších hodnot dosáhl jednozonální model pro hodnotu kvantilu 0.75. Pro ostatní nastavení se hodnota kvantilu, při kterém bylo lokálně dosaženo nejlepších výsledků pohybovala okolo 0.75.

V dalším kroku bylo provedeno vyhodnocení předpovědi málovodých období z důvodu umístění měrného profilu nad nádrží Vranov. Při tomto vyhodnocení byly odstraněny povodňové průtoky, které byly považovány za dvojnásobek dlouhodobého průměrného průtoku. Málovodé průtoky jsou důležité z pohledu zásobní funkce nádrže. Díky nedostačujícím výsledkům na suchou prognózu bylo přistoupeno k modifikaci a zredukování.

Dále se hledali různé nastavení počtu a hodnot kvantilů pro dosažení lepších výsledků, viz tabulka 5, a to s kombinací kvantilů 0.75 a 0.95, kdy se přepínalo mezi kvantily při dosažení hodnoty kvantilu 0.9 u předchozího reálného průtoku.

Závěrem lze konstatovat, že cíl práce byl splněn a myslím si, že jsme schopni v tomto tématu pokračovat, protože daná problematika se bude vyvíjet a má podle mého názoru velký potenciál.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HŘEBÍČEK, J. a J. KALINA. *Klasifikace modelů* [online]. Brno: Institut biostatistiky a analýz, 2017 [cit. 2020-05-26]. Dostupné také z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2017/Bi3101/um/02\\_klasifikace\\_modelu.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2017/Bi3101/um/02_klasifikace_modelu.pdf)
- [2] MCGARIGAL, K. Analysis of Environmental Data (ECO 602). In: *Umass.edu* [online]. © 2010 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://www.umass.edu/landeco/teaching/ecodata/schedule/ecodata\\_schedule.html](https://www.umass.edu/landeco/teaching/ecodata/schedule/ecodata_schedule.html)
- [3] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ R., J. FRAJER a J. GELETIČ. Determické modely. In: *Hydro.upol.cz* [online]. © 2009 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://hydro.upol.cz/?page\\_id=15](http://hydro.upol.cz/?page_id=15)
- [4] PŘESLIČKA, Jiří. *Zpracování přehledu a popisu epizodních modelů srážko-odtokových událostí pro odnos látek*. České Budějovice, 2012. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. Vedoucí práce Jana Moravcová.
- [5] NACHÁZEL, K., M. STARÝ a J. ZEZULÁK. *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-0229-4.
- [6] SVETLÍKOVÁ, D. a kol. *Využitie hybridných metód v hydrologických predpovediach*. Ostrava: KEY Publishing s.r.o., 2010. ISBN 978-80-7418-084-2.
- [7] ŠENKOVÁ, L. Konstrukce předpovědního modelu pro průtok vody v měrném profilu. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Tomáš Kozel.
- [8] NEUBAUER, J. *Regresní analýza: Statistika II* [online]. Brno: Katedra ekonometrie FVL UO Brno, 2016 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/regrese1.pdf>.
- [9] STARÝ, M. *Hydrologie. Modul 01*. Brno: Vysoké učení technické, 2005.
- [10] DANEL, Roman. *Predikce časových řad pomocí autoregresního modelu (Studijní opora)*. Ostrava: VŠB TU, 2004.

- [11] MENŠÍK, P., M. STARÝ a D. MARTON. Using Predictive Model of Mean Monthly Flows for Large Open Reservoirs Hydropower Control. *Procedia Engineering* [online]. 2014, 89: 1486-1492 [cit. 2015-12-24]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.435. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814025508>
- [12] MENŠÍK P., M. STARÝ a D. MARTON. Using Predictive Models of Mean Monthly Flows for Operative Outflows Control from Large Open Reservoirs. In: *Proceedings ITISE 2014, International work- conference on Time Series* [online]. Granada: Copicentro Granada S. L, 2014. p. 382–395. [cit. 2015-12-25]. ISBN 978-84-15814-97-9.
- [13] KOZEL, T. *Stochastické řízení zásobní funkce nádrže pomocí metod umělé inteligence*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Miloš Starý.
- [14] URBANEC, P. *Předpovědní model průtoku vody v měrném profilu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Tomáš Kozel.
- [15] HAVLÍK, A. *Základy hydrologie* [online]. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2012 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Hydrologie.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Hydrologie.pdf). Přednáška. Fakulta stavební ČVUT.
- [16] ALTIUS DIRECTORY. MATLAB Programming Language. *Altiusdirectory.com* [online]. © 2007 [cit. 2018-05-17]. Dostupné také z: <http://www.altiusdirectory.com/Computers/matlab-programming-language.php>
- [17] BURŠÍK, L. Simulační model soustavy nádrží v povodí řeky Dyje. Brno, 2019. Bakalářská práce, . Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Pavel Menšík.
- [18] VRANOVSKO.CZ. Vranovská přehrada-vznik díla. *Vranovsko.cz* [online]. © 2015 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.vranovsko.cz/vranovska-prehrada-jak-vzniklo-toto-vodni-dilo/>

- [19] ŠVIHÁLEK, M. *Stavitel přehrad: putování legendárního moravského vodohospodáře Jana Čermáka 20. stoletím*. Praha: Grada, 2013. TĚN. ISBN 978-80-247-4465-0.
- [20] ČÍŽKOVÁ, R. *Vodstvo ČR* [online]. Praha: Základní škola Campanus, 2017 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.campanus.cz/cizkova/wp-content/uploads/sites/56/2017/08/Vodstvo-ČR.pdf>
- [21] POVODÍ MORAVY. Plán oblasti povodí Dyje: A - Popis oblasti povodí. *Pmo.cz* [online]. © 2009 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/pop/2009/Dyje/end/a-popis/a-1.html>
- [22] V-PRESS. Na kole podél Dyje. In: *Ivelo.cz* [online]. 11. 12. 2014 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.ivalo.cz/trasy/podel-ceskych-rek-dyje/>

## 10 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

a....	koeficienty, nebo parametry chování systému
a1.....	regresní koeficienty
B.....	autoregresní regulátor
b1, b2 ..bp	koeficienty autoregresního popisu
Et, er.....	bílý šum
j.....	pořadí měsíce
NS.....	neuronové sítě
p(1).....	korelační koeficienty
p(k).....	korelační koeficienty
Qp....	mMěsíční průtok
Qr.....	reálný průtok
S2.....	součet čtverců chyb
W, $\psi$ t.....	parametry
X.....	vysvětlující proměnná
Y, $\epsilon$ .....	náhodné veličiny
y.....	logaritmus
Y.....	vysvětlovaná proměnná
yt.....	nová hodnota řady
Z, rnd.....	náhodné číslo generované z normovaného normálního rozdělení
Z,jjk...	poslední členy reálné průtokové řady
Z.....	transformovaný průměrný měsíční průtok
Zj...	předchozí hodnoty průměrných měsíčních průtoků
$\beta$ 1, $\beta$ 2.....	neznámé reálné konstanty
$\mu$ (y).....	střední hodnota
$\sigma$ y.....	směrodatná odchylka

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení deterministického modelu [4].....	17
Obr. 2 Schéma modifikovaného zonálního modelu [13].....	20
Obr. 3 Příklad stochastického předpovědního modelu z ČHMÚ .....	21
Obr. 4 Stanovení $Q_r$ z čáry překročení průtoků [7] .....	22
Obr. 5 Hustota pravděpodobnosti obecného normálního rozdělení [14].....	28
Obr. 6 Hustota pravděpodobnosti normovaného normálního rozdělení [14] .....	29
Obr. 7 Ukázka teoretické čáry překročení [15].....	31
Obr. 8 Ukázka empirické čáry překročení [15] .....	31
Obr. 9 Vodní stavy sestaveny sloupcovými grafy [15] .....	32
Obr. 10 Čára opakování [15] .....	33
Obr. 11 Umístění profilu v rámci České republiky (červená tečka značí umístění profilu) [20].....	35
Obr. 12 Umístění profilu v rámci povodí Dyje (červená tečka značí umístění profilu) [21].....	36
Obr. 13 Česká část řeky Dyje na mapě [22] .....	37
Obr. 14 Kaňon řeky Dyje, Národní park Podyjí [21] .....	38
Obr. 15 Rovinný úsek řeky Dyje přitékající do zájmového území.....	39
Obr. 16 Javořice – nejvyšší bod na Dyji.....	40
Obr. 17 Jez na začátku obce Podhradí nad Dyjí po dešti.....	40
Obr. 18 Jez na začátku obce Podhradí nad Dyjí před deštěm .....	41
Obr. 19 Jez v Podhradí nad Dyjí po dešti .....	41
Obr. 20 Jez na konci obce ovlivňující data z měrné stanice .....	42
Obr. 21 Měření hladiny nad 4 metry výšky .....	44
Obr. 22 Historické povodně.....	45
Obr. 23 Měření hladiny okolo 2–3 metrů výšky.....	46
Obr. 24 Měření hladiny okolo 1 metru výšky.....	47
Obr. 25 Nejvyšší zaznamenané vodní stavy hladiny z ČHMÚ .....	48
Obr. 26 Vodní nádrž Vranov [21].....	49
Obr. 27 Vodní elektrárna Vranov nad Dyjí [19].....	50
Obr. 28 Vodní hráz Vranov [19].....	51

Obr. 29 Stínový reliéf nížin a hor vodní nádrže Vranov .....	51
Obr. 30 Reálná průtoková řada .....	52

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vyhodnocení výsledků zóny 1 .....	53
Tab. 2 Vyhodnocení výsledků zóny 2 .....	54
Tab. 3 Vyhodnocení výsledků zóny 3 .....	55
Tab. 4 Souhrnná tabulka všech nejlépe dosažených výsledků .....	55
Tab. 5 Výsledky po modifikaci průtoků .....	56