



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

# VLIV HYDROLOGICKÝCH A PROVOZNÍCH NEJISTOT NA KOMPLEXNÍ VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ÚDOLNÍ NÁDRŽE

IMPACT OF HYDROLOGIC AND OPERATIONAL UNCERTAINTIES ON COMPLEX WATER  
MANAGEMENT ANALYSIS OF OPEN WATER RESERVOIR

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Havlík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Martin Havlík
<b>Název</b>	Vliv hydrologických a provozních nejistot na komplexní vodohospodářské řešení údolní nádrže
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Daniel Marton, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

MARTON, D.; STARÝ, M.; PASEKA, S.; MENŠÍK, P. Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat. In XXXV. Přehradní dny 2016 Sborník příspěvků - svazek 1. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. s. 120-127. ISBN: 978-80-01-05969-2.

MARTON, D.; STARÝ, M.; MENŠÍK, P. Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity. Journal of Hydrology and Hydromechanic, 2015, roč. 63, č. 4, s. 287-294. ISSN: 0042-790X.

STARÝ, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. s. 1-216.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Hlavní skupinou nejistot, která může výrazně zkreslit výsledky návrhu objemů vody v nádrži, jsou především nejistota přítoku vody od nádrže a batygrafických křivek, ale také nejistota výparu vody z hladiny. Uvedené nejistoty mohou negativně ovlivnit návrh celé nádrže, od velikostí objemu až po výslednou výšku a cenu hráze. Práce si klade za cíl odhadnout velikost nejistot komplexního vodohospodářského řešení nádrže. To znamená návrhu prostotu stálého nadržení, zásobního a ochranného objemu v podmínkách nejistot a jeho vhodnou interpretaci pro další využití.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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. Daniel Marton, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tématem práce je vodohospodářské řešení zásobního a retenčního objemu vodní nádrže Hanušovice na řece Krupá. V rámci práce se provede výpočet zásobního a retenčního objemu uvažované nádrže. K výpočtu objemů zásobního a retenčního prostoru byly použity programy HYDROG a UNCE\_RESERVOIR. Cílem práce je analýza vlivu nejistot na řešení zásobního i retenčního objemu nádrže, která je provedena na aktuální hydrologické podmínky v povodí a aktuální požadavky vznesené státním podnikem Povodí Moravy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vodohospodářské řešení, ochranná funkce, retenční prostor, zásobní objem, nejistoty, ztráty

## **ABSTRACT**

Theme of the work is a water management analysis of the Hanušovice reservoir on the river Morava/Krupá. In the framework will be make to calculating of the active capacity and retention capacity thinking reservoir. Software HYDROG and UNCE\_RESERVOIR will be used, which calculating analysis reservoir. Target of the work is analysis impact uncertainties to active and retention capacity of reservoir, which is conduction on actually hydrologic conditions in river basin a actual lay requisition national company Povodí Moravy.

## **KEYWORDS**

Water management analysis, safety function, retention capacity, storage volume, uncertainties, loss

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Martin Havlík *Vliv hydrologických a provozních nejistot na komplexní vodohospodářské řešení údolní nádrže*. Brno, 2017. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 10. 2017

---

Bc. Martin Havlík  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Danielu Martonovi, Ph.D., za odborné vedení této práce, za poskytnutí cenných rad a podkladů. Chtěl bych též poděkovat svým rodičům, kamarádům a spolužákům za jejich podporu v průběhu studia.

# Obsah

1.	ÚVOD.....	1
2.	CÍL PRÁCE.....	3
3.	NEJISTOTY.....	4
3.1	Stanovení nejistot.....	4
3.2	Metoda Monte Carlo.....	7
3.3	Stanovení statistických charakteristik.....	8
3.3.1	Střední hodnota $\mu_x$ .....	9
3.3.2	Směrodatná odchylka $\sigma_x$ .....	9
3.3.3	Koeficient variace $C_{v,x}$ .....	10
3.3.4	Koeficient asymetrie $C_{s,x}$ .....	10
3.4	POPIS DAT VSTUPUJÍCÍCH DO VODOHOSPODÁŘSKÉHO ŘEŠENÍ.....	11
3.4.1	Batygrafické čáry.....	11
3.4.2	Přítok vody do nádrže.....	11
3.4.3	Výpar.....	12
4.	METODY.....	13
4.1	Metoda Monte Carlo.....	13
4.2	Simulační model zásobního objemu nádrže UNCE_RESERVOIR.....	15
4.2.1	Úloha typu $V_z (O_p; P)$ pro $P = 100\%$ .....	15
4.2.2	Úloha typu $P (O_p; V_z)$ .....	16
4.3	Srážkoodtokový MODEL HYDROG.....	18
5.	PRAKTICKÁ APLIKACE.....	19
5.1	Popis území.....	19
5.1.1	Informace a technické údaje.....	19
5.2	VSTUPNÍ HODNOTY DO VÝPOČTŮ.....	21
5.3	VÝPOČET ZÁSOBNÍHO OBJEMU NÁDRŽE.....	23
5.3.1	Úloha typu $V_z (O_p; P)$ pro $P=100\%$ .....	24
5.3.2	Úloha typu $P (O_p; V_z)$ .....	29
5.4	VÝPOČET RETENČNÍHO OBJEMU NÁDRŽE.....	34
5.4.1	DETERMINISTICKÉ ŘEŠENÍ.....	34
5.4.3	STOCHASTICKÉ ŘEŠENÍ.....	39
5.5	KOMBINACE NEJISTOT.....	50
5.5.1	Objemy nádrže.....	50
6.	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	57



7.	ZÁVĚR .....	63
8.	POUŽITÉ ZDROJE .....	65
9.	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	67
10.	Seznam tabulek .....	69
11.	Seznam obrázků .....	71
12.	Seznam grafů .....	72

## 1. ÚVOD

Většina lidské činnosti i přírodních procesů je významně ovlivňována klimatem a jejich následnými změnami. Mezi nejvýznamnější a takto ovlivňované kategorie patří zemědělství, lesnictví a vodní hospodářství. Značné (extrémní) změny klimatu na výše uvedené oblasti přináší dopady, které mohou pro danou oblast být negativní nebo pozitivní. [12]

Největší negativní vliv na vodních stavech v nádržích, vodních tocích a jiných objektech, které mají za cíl kumulovat a transportovat vodu, má extrémní a dlouhotrvající sucho. Sucho může podhodnocovat a snižovat hladinu jak podzemní, tak i povrchové vody, způsobuje rovněž i výrazný pokles odtoku. Dochází též k průběžnému zvyšování evapotranspirace, která sice bývá na většině území kompenzována srážkami, na některých místech ovšem k této kompenzaci nedochází.

Hlavní důvod poklesu zásob vodních zdrojů představuje zmenšení zásob ve sněhové pokrývce. Následně pak dochází ke snížení hladiny podzemní vody a průtoků a to nejčastěji v obdobích málovodných, tj. na přechodu léta a podzimu. V období 2040-2060 je pak předpokládán pokles množství sněhové pokrývky až o jednu třetinu.

Naopak k tomu mohou působit dešťové i sněhové srážky. Měly by doplňovat a udržovat stavy vodních hladin minimálně na úrovni  $Q_{365d}$ , které byly sníženy z let méně častých srážkových úhrnů. Častější výskyt srážek by zvýšil hladiny ve vodních tocích a nádržích, tím by pak nedocházelo k jejímu rychlejšímu ohřívání a doba zadržování vody v nádržích by se výrazně zkrátila. Díky výše uvedeným důvodům by pak mohlo docházet ke zlepšování kvality a jakosti podzemních a povrchových vod. Při výskytu extrémních dešťových srážek dochází k rychlému nasycení a zaplnění půdy a většina vody se tak akumuluje ve vodních tocích a nádržích. Může též docházet k rychlejšímu znečišťování a znehodnocování vody ve vodních tocích vlivem eroze půdy. V závislosti na intenzitě, četnosti a době trvání srážek vodní hladina stoupá a mohou se tak častěji vyskytovat povodňové situace. V posledních patnácti letech na území České republiky se extrémní změny klimatu vyskytovaly častěji a výrazně tak měnily hydrologický režim v povodí.

*Rozhodně stojí za zmínku i rok 2015, kdy přetrvávalo velmi dlouhé a teplé období téměř bez srážkových úhrnů. Při tomto suchém létu se dařilo stabilizovat a udržovat ekologickou stabilitu v tocích jen díky nadlepšování průtoků pomocí vodních nádrží. Například průtoky ve správě Povodí Moravy, s.p. se v tocích pohybovaly od 3 do 30 %*

*dlouhodobého průměru. Rok 2015 se prozatím odhaduje jako nejsušší rok za posledních 12 let.* [11, s. 10]

I vzhledem ke změnám v hydrologickém režimu v povodích byla na národní úrovni dne 22. března 2017 přijata *Politika ochrany klimatu v České republice*. Ta obsahuje cíle a opatření na snižování emisí skleníkových plynů. Předtím byla navíc v roce 2015 schválena *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*, která je připravena na období 2015-2020 s výhledem do roku 2030. Strategie má za cíl zmírnit dopady změny klimatu přizpůsobením se co nejvíce této změně, zachovat dobré životní podmínky a uchovat, příp. vylepšit hospodářský potenciál pro příští generace. Dále identifikuje prioritní oblasti, u kterých se předpokládají největší dopady změny klimatu. Akční plán podrobněji přibližuje a popisuje opatření uvedená ve strategii do sto šedesáti prioritních úkolů. Většina těchto úkolů je ovšem obsažena v jiných strategických materiálech, které mohou spadat již pod jiná ministerstva. [20]

Provoz vodních nádrží může též negativně ovlivňovat i samotné vodohospodářské řešení, její výpočet, a to i v podmínkách nejistot. V praxi se běžně používá zjednodušený, ale přesto relativně přesný postup, kdy deterministické řešení je přenásobeno koeficientem, který se v konečném řešení snaží zahrnout všechny nejistoty a pokrýt veškeré odchylky. Přesto v samotném návrhu a řešení v praxi může docházet ke značným chybám a nepokrytí veškerých nejistot. Větší chyby mohou způsobit neočekávané výpadky nádrže, vysoké ekonomické škody a improvizace při řízení nádrží.

Z výše uvedených důvodů je patrné, že nejistoty při měření a výpočtech mají značný vliv na návrh nádrže a její následné řízení. Pro optimální řízení posuzované nádrže se stanovuje manipulační řád. V něm jsou popsány pokyny při mimořádných událostech, kterými bezprostředně jsou povodně. Stejně tak můžeme brát i havárii na vodním díle, její poškození, zhoršení jakosti vody a období sucha. I zde se může projevit značné ovlivnění nejistotami na vstupních datech pro návrh vodní nádrže. O to přesnější a důkladnější by mělo být stanovení výsledků, které zahrnou nejpesimističtější varianty nejistot.

## 2. CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je stanovení nejistot na vstupních datech a jejich následná analýza vlivu na vodohospodářském řešení jak zásobní, tak i ochranné funkce nádrže.

Hlavní skupinou nejistot, která může výrazně zkreslit výsledky návrhu objemů vody v nádrži, jsou především nejistota přítoku vody do nádrže a batygrafických křivek, ale také nejistota výparu z vodní hladiny. Uvedené nejistoty mohou negativně ovlivnit návrh celé nádrže, od velikostí objemu až po výslednou výšku a náklady na výstavbu hráze. Dále mohou mít vliv i na výsledné hodnoty zabezpečení nádrže a to podle trvání i podle dodávky vody a jejich následné zatřídění dle významnosti.

Práce si klade za cíl odhadnout velikost nejistot komplexního vodohospodářského řešení nádrže. Jedná se zejména o návrh prostoru stálého nadržení, zásobního a ochranného objemu v podmínkách nejistot. Konečným výstupem by měl být návrh a stanovení nejoptimálnější varianty nádrže v dané lokalitě.

### 3. NEJISTOTY

#### 3.1 Stanovení nejistot

*Pojem nejistoty měření byl poprvé definován Západoevropským kalibračním sdružením v usnesení WECC 19/90. V následujících letech byly sestaveny závazné normové předpisy, které definovaly podstatu a teorii jejího stanovení.*

*Účelem stanovení nejistoty při měření dané veličiny je zjištění intervalu možného výskytu jejich hodnot okolo výsledku měření, který lze přiřadit k hodnotě měřené veličiny.*

*Na začátku jakéhokoliv zpracování nejistot stojí detailní porozumění podstaty prováděného měření, popsaného modelem měření. To samozřejmě znamená nejen nutnost detailní znalosti principů, funkcí a konstrukčních detailů každého měřicího přístroje, ale i znalost metody měření a schopnost se rozhodnout jaké vlivy mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistoty a ovlivnit výsledek. Mnohdy jsou tyto informace obsaženy v návodu k použití konkrétních přístrojů, nebo v popisu již prověřených metod měření [16].*

*V teorii nejistot měření existují dva základní typy nejistot. Nejistoty měření jsou rozděleny podle způsobu, jakým byly získány, na nejistoty*

- *typu A,*
- *typu B.*

*Z pohledu matematické statistiky byla jako míra standardní nejistoty měření zvolena směrodatná odchylka příslušného rozdělení pravděpodobnosti pro jednotlivé zdroje nejistot. Nejistoty typu A a typu B se liší jen způsobem, jakým je tato směrodatná odchylka získána [10].*

#### **Výpočet nejistoty typu A**

*Stanovení nejistoty typu A je provedeno výpočtem z opakovaně provedených měření. Vychází tedy ze statistického zpracování opakované série měření. Standardní nejistota typu A  $u_A$  je vyjádřena pomocí směrodatné odchylky výběrových průměrů (1).*

$$u_A = s_x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

*kde ve vztahu znamená:*

- $n$  ... počet měření dané veličiny,  
 $i$  ...  $i$ -tá hodnota měřené veličiny,  
 $x_i$  ...  $i$ -tý opakovaný výběr (opakované měření),  
 $\bar{x}$  ... je výběrový průměr neboli střední hodnota stanovená jako (2)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2)$$

V případě malého počtu měření  $n$  je menší než 10 se výsledná nejistota měření koriguje pomocí opravného koeficientu  $k_s$ . Součinem směrodatné odchylky výběrových průměrů  $s_{\bar{x}}$  a opravného koeficientu  $k_s$  vznikne výsledná hodnota standardní nejistoty typu A  $u_A$ .

### **Výpočet nejistoty typu B**

Na rozdíl od nejistoty typu A, která byla stanovena z opakovaných měření, pro složky nejistoty typu B platí, že jsou stanoveny jinak než opakovaným měřením. Rozdíl mezi typem A a typem B je tedy jasný, problém je však v tom, jak jinak je tedy nejistota typu B stanovena. Zde je nutné nejprve najít všechny možné zdroje nejistot.

Zdroje nejistot typu B mohou být následující [16]:

- *Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení. Do této skupiny patří například vliv nejistoty kalibrace nebo ověření, stabilita přístrojů. Dynamické chyby přístrojů, vnitřní tření v přístrojích, hystereze, rozlišení odečtu z přístrojů a další.*
- *Vlivy okolního prostředí a jejich změny. Zde se jedná především o tlak, případně změnu tlaku, relativní vlhkost, elektrické pole, magnetické pole, prašnost a další.*
- *Vliv metody. Tato skupina zahrnuje především vliv interakce s měřeným předmětem, použití konstant, odvod či přestup tepla, vlivy reálných parametrů oproti ideálním uvažovaným v modelech a další.*
- *Vliv operátora. Zde jde především o nedodržení metodik, osobní zvyklosti, paralaxa, tepelné vyzařování.*
- *Ostatní vlivy. Převážně sem patří náhodné omyly při odečtech a zápisu hodnot, těžko postihnutebné globální vlivy.*

Při určování standardní nejistoty typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů  $u_{B;j}$ . Je-li známa maximální odchylka  $j$ -tého zdroje nejistoty  $z_{jmax}$ , je standardní nejistota  $u_{B;j}$  určena podle vztahu (3).

$$u_{Bzj} = \frac{z_{j\max}}{\chi} . \quad (3)$$

Ve vztahu (3) značí:

$z_{j\max}$  ... známá maximální odchylka zdroje nejistoty,

$\chi$  .... je součinitel vycházející z daného rozdělení pravděpodobnosti, kterým se daný zdroj řídí (pro normální rozdělení  $\chi = 3$ ).

Výsledná standardní nejistota typu B se určí pro  $n$  odpovídající počet zdrojů nejistoty  $z_1, z_2, \dots, z_n$  geometrickým součtem nejistot jednotlivých zdrojů (4).

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{Bzj}^2} . \quad (4)$$

Takto se standardní nejistota typu B převede do zcela nové podoby, která má opět charakter směrodatné odchylky [9].

### **Kombinovaná nejistota**

Kombinovaná standardní nejistota  $u$  je stanovena geometrickým průměrem standardní nejistoty typu A  $u_A$  a standardní nejistoty typu B  $u_B$  (5).

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} . \quad (5)$$

### **Standardní a rozšířená nejistota**

Standardní kombinovaná nejistota  $u$  byla určena s pravděpodobností cca  $P = 68,2 \%$ , tj. pro koeficient rozšíření  $k = 1$ . Pro jinou pravděpodobnost se nejistota přepočte vynásobením koeficientem rozšíření  $k$ . Vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření  $U$  má tvar (6):

$$U = u \cdot k . \quad (6)$$

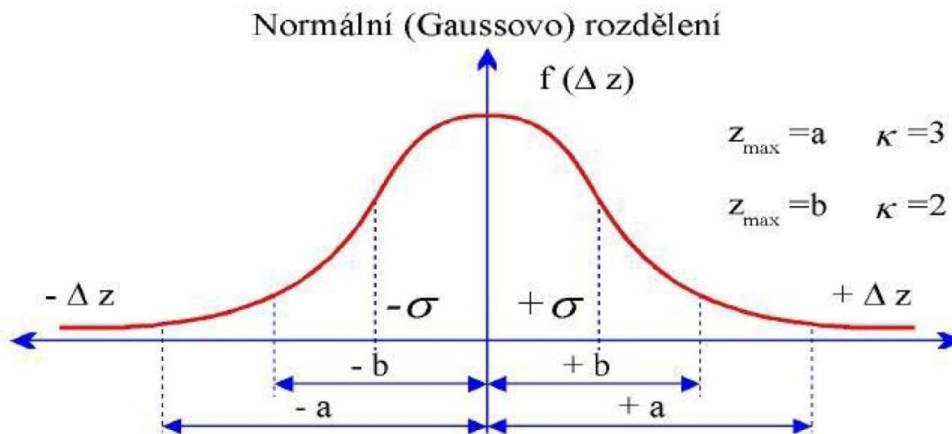
Ve vztahu (6) značí:

$k$  ... je koeficient rozšíření, jeho hodnota obecně záleží na druhu použitého rozdělení pravděpodobnosti.

Jak již bylo v textu uvedeno, výše popsaným postupem se získá standardní kombinovaná nejistota  $u$ . Standardní znamená, že při skládání byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Při splnění jistých předpokladů je možné považovat rozdělení takto určené nejistoty za

přibližně normální. Z toho pak vyplývá, že takto vypočtená nejistota pokrývá asi 68,2 % možných výsledků, jinak řečeno, asi 1/3 výsledků může padnout mimo takto stanovené pole nejistot. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžité dva základní koeficienty rozšíření  $k = 2$  a  $k = 3$  pro pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95,4%, resp. 99,6 %. Případy standardní a rozšířené nejistoty jsou ilustrovány pro normální rozdělení na obr. 1 [10].

pásmo  $\pm\sigma$  představuje standardní nejistotu,  
 pásmo  $\pm b$  představuje rozšířenou nejistotu pro  $k = 2$   
 pásmo  $\pm a$  představuje rozšířenou nejistotu pro  $k = 3$ .



**Obrázek 1** - Případy standardní a rozšířené nejistoty pro normální rozdělení pravděpodobnosti

*Poznámka*

V práci bude pro výpočet všech hodnot rozšířené nejistoty  $U$  používán koeficient rozšíření  $k$  vycházející z předpokládaného normálního rozdělení pravděpodobnosti. To znamená, že pro rozšířenou nejistotu  $U_a$  odpovídá koeficient rozšíření  $k = 3$ . Pro rozšířenou nejistotu  $U_b$  odpovídá koeficient rozšíření  $k = 2$ . [5]

Výše uvedený postup byl převzat z práce (Marton, 2011, s. 16 - 18).

### 3.2 Metoda Monte Carlo

Metoda Monte Carlo je jedna z numerických metod, která se řeší modelováním náhodných veličin a statistického odhadu jejich charakteristik.

Základ metody Monte Carlo byl znám již dávno; např. v roce 1873 se objevil článek A. Halla o určení čísla pomocí náhodného házení jehly na rovinu pokrytou rovnoběžkami. Tento náhodný pokus je znám pod názvem Buffonova úloha o jehle. [2, s. 6]

Stanislaw Marcin Ulam a John von Neumann jsou nejčastěji spojováni s počátky a rozvojem této metody. Nechali se inspirovat ruletou, odtud také pochází název celé metody – Monte Carlo. V americké Národní laboratoři Los Alamos zkoumali chování neutronů. Metoda Monte



Carlo sehrála klíčovou roli při vývoji atomové bomby za 2. světové války, kdy se při simulacích odhadovala štěpná reakce.

Pravděpodobně první využití metody s reálnými výsledky se datuje k roku 1930. Enrico Fermi ji využíval ke generování náhodných čísel k výpočtu vlastností v té době nově objevené částice - neutronu.

Algoritmy založené na principu metody Monte Carlo mají společný postup výpočtu. Tím jsou mnohokrát opakované náhodné pokusy – odhady náhodné veličiny. Takto se dají řešit úlohy deterministické i stochastické. Pro stochastické řešení je nutné znát pravděpodobnostní rozdělení sledovaných veličin. Pro deterministické řešení je třeba definovat předběžné předpoklady, výsledkem je pouze jedno řešení. Je využívána zejména pro výpočet integrálů hustot pravděpodobností spojitých náhodných veličin, zejména pak vícerozměrných, kde běžné metody nejsou efektivní. Lze ji využít v širokém poli působnosti, a to od simulací náhodných experimentů až po numerické řešení diferenciálních rovnic. Dále se může metoda využít v oblasti financí, obchodu, fyziky, fyzikální chemie, výpočetní techniky, her atd.

### **3.3 Stanovení statistických charakteristik**

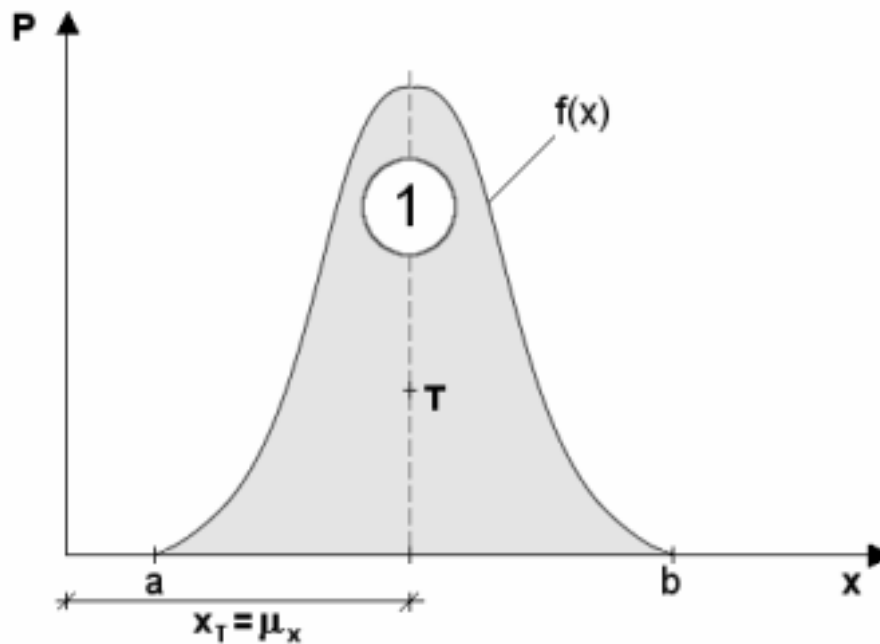
Pro podrobnější popis parametrů základního souboru se využívají statistické charakteristiky. Mezi nejčastěji takto hodnocené parametry patří

- střední hodnota,
- disperze,
- směrodatná odchylka,
- koeficient variace,
- koeficient asymetrie,
- koeficient špičatosti.

### 3.3.1 Střední hodnota $\mu_x$

Střední hodnota určuje polohu těžiště hustoty pravděpodobnosti, konkrétně potom  $x$ -ovou souřadnici. Je dána hodnotou prvního obecného momentu a platí podle následujícího vztahu:

$$\mu_x = \mu(x) = \mu[x] = m_1[x] = \int_a^b xf(x)dx \quad (7)$$

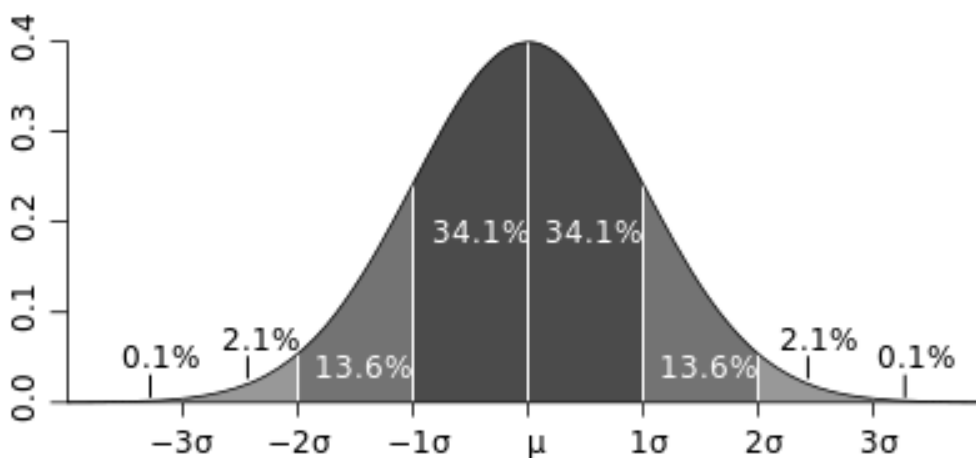


Obrázek 2 - Střední hodnota s  $x$ -ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti

### 3.3.2 Směrodatná odchylka $\sigma_x$

Druhým centrálním momentem je disperze  $D_x$  neboli rozptyl. Odmocněním disperze se získává hodnota směrodatné odchylky a značí se  $\sigma_x$ . Platí pro ni vzorec (8):

$$\sigma_x = \sigma(x) = \sigma[x] = \sqrt{D_x} \quad (8)$$



Obrázek 3 - Procentuální rozdělení pravděpodobnosti náhodného výběru prvku  
(zdroj: <https://matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni>)

Její rozměr je stejný jako rozměr měřené veličiny, což je její výhodou oproti rozptylu. Dá se také definovat jako průměrná odchylka hodnot od střední hodnoty a popisuje vlastní variabilitu souboru.

### 3.3.3 Koeficient variace $C_{v,x}$

Koeficient variace je dán podílem odmocniny druhého a prvního centrálního momentu (9), tedy směrodatné odchylky a střední hodnoty. Slouží k porovnání souborů, které se od sebe liší. Vyjadřuje relativní míru variability a udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru.

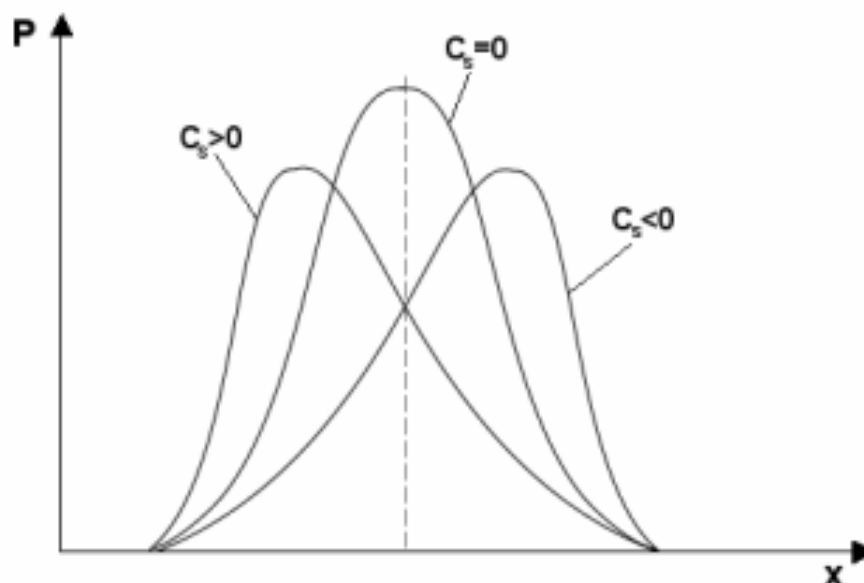
$$C_{v,x} = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (9)$$

### 3.3.4 Koeficient asymetrie $C_{s,x}$

Koeficient asymetrie popisuje asymetrii jevů kolem aritmetického průměru. Početně se vyjádří jako podíl třetího centrálního momentu (11) a třetí mocniny směrodatné odchylky (10). V případě, že  $C_s > 0$ , naklání se křivka hustoty pravděpodobnosti doleva,  $C_s = 0$  je symetrická,  $C_s < 0$  se naklání doprava.

$$C_{s,x} = \frac{M_3(x)}{\sigma^3(x)} \quad (10)$$

$$M_3(x) = m_3(x - \mu_x) = \int_a^b (x - \mu_k)^3 f(x) dx \quad (11)$$



Obrázek 4 - Vliv koeficientu asymetrie

### 3.4 POPIS DAT VSTUPUJÍCÍCH DO VODOHOSPODÁŘSKÉHO ŘEŠENÍ

Do vodohospodářského řešení vodní nádrže a jeho návrhu vstupují jako hlavní podklady hydrologická, morfologická a ztrátová data. Proto je velmi důležitý jejich popis a analýza. Měla by nám napovědět to, zda je vhodné umístit nádrž do vytipované oblasti, a to z hlediska vodního potenciálu toku, morfologie terénu, geologie oblasti atd. Pro návrh oblasti je též důležité provést geologický a hydrogeologický průzkum. Vybudování větší stavební konstrukce může způsobit sesuvy půdy, které mohou vést k následným ekologickým i ekonomickým škodám. A v neposlední řadě je na místě zohlednit při návrhu případné poškození liniové stavby a komunikace.

#### 3.4.1 Batygrafické čáry

*Morfologii údolí popisujeme pomocí batygrafických čar, tj. čáry zatopených ploch a čáry zatopených objemů, které se rovněž nazývají charakteristikami nádrže. Čára zatopených ploch udává závislost mezi výškou plnění nádrže  $H$  a příslušnou plochou hladiny  $F$  odpovídající plnění. Čára zatopených objemů udává závislost mezi výškou plnění nádrže  $H$  a příslušným zatopeným objemem  $V$ . Při konstrukci těchto čar je prvotní čára zatopených ploch. Jako podklad pro její stanovení je nutno použít mapy pro podrobnou situaci zátopy, které nesmějí být v měřítku menším než 1:5 000. Postup je následující. V nejnižším místě nádrže, vytvořené předpokládanou hrází a stěnami údolí, takže vzniká uzavřený útvar, je položena výška plnění nádrže  $H_0$ . Výška plnění se udává buď v reálných výškách  $H_0=0$ , nebo přímo v nadmořských výškách v metrech nad mořem. Této výšce plnění odpovídá plocha hladiny  $F_0=0$ . Vlastní čáru získáme spojením těchto bodů buď pomocí křivítka, nebo přímkou. Konstrukce je přibližná a závisí na měřítku použitých podkladů a na volbě velikosti  $\Delta H$ . Odvození čáry zatopených objemů je následující. Necht' v diskrétním bodě výšky plnění  $H_i$  je dána zatopená plocha  $F_i$  a odpovídající objem plnění nádrže  $V_i$ . Zvětšíme-li plnění nádrže na hodnotu  $H_{i+1}$ , při dané zatopené ploše  $F_{i+1}$ , je dán odpovídající objem plnění nádrže hodnotou  $V_{i+1}$ , která je přibližně rovna*

$$V_{i+1} = V_i + \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (H_{i+1} - H_i) \quad (12) \quad [3, s. 11]$$

#### 3.4.2 Přítok vody do nádrže

Hodnoty přítoku do nádrže jsou dány z měření na jednotlivých vodoměrných stanicích. Umístění stanic může ovlivňovat návrh samotné nádrže a jednotlivé výpočty např. zásobního objemu. Na důležitých místech vodních toků a na přítocích do nádrží se nejčastěji zřizují limnigrafy, které spojitě zapisují vodní stav na speciálním grafikonu, limnigramu. Nejčastěji

se pro tento způsob měření využívá plovákový limnigraf. Důležité v rámci měření a stanovení hodnot průtoků je i určení důležitých jevů na řekách. Např. tvoření a odchod ledů, varovná služba za velkých průtoků vod, která je významná z pohledu bezpečnosti obyvatel v příbřežních zónách a může tak zabránit velkým škodám. [13] Přítok vody do nádrže se dá rozdělit dle potenciálu a využití na energetické, zásobní, rekreační a ochranný.

I přes kvalitní vybavení může dojít k jistým nepřesnostem měření. Jednou možností může být výpadek elektrické energie, dále pak fyzické poškození techniky, zanesení koryta plaveninami před měrným přístrojem atd. Tyto varianty nejistot tak mohou ovlivnit hodnoty průtoků.

### 3.4.3 Výpar

Výpar určuje neustálý pohyb molekul vody, který narůstá se zvyšující se teplotou. Některé molekuly ovšem překonávají svojí přilnavost k sousedním molekulám a přecházejí tak do ovzduší. Výpar vychází z řady činitelů, např. velikosti plochy, jejím tvarem, barvy, zásoby vody, teploty a vlhkosti vzduchu, síly větru atd. V praxi rozlišujeme výpar na výpar z volné hladiny, výpar z půdy a výpar rostlinami.

*Výpar z vodní hladiny je poměrně nejjednodušší. U vodních nádrží je nejvýznamnější složkou ztrát vody. Tento výpar se v našich podmínkách pohybuje v rozmezí cca 1 až 3 mm za den a 200 až 800 mm za rok, především v závislosti na teplotě a nadmořské výšce. [13, s. 25]*

Hodnota denního výparu se dá spočítat dle Šermerova vztahu:

$$H_{v,d} = 0,931 d + 0,20 \quad (13)$$

kde  $d$  je průměrná měsíční hodnota sytostního doplňku v torrech. Pro měření se používají výparoměry (Wildův, Rónův, Šermerův).

## 4. METODY

### 4.1 Metoda Monte Carlo

Níže popsaný obecný princip zavedení metody Monte Carlo vychází z práce *Stary (1984)* [19] a byl dále rozveden v práci *Marton (2011)* [5]. Za náhodné průtokové řady v tomto případě jsou považovány náhodné hydrogramy povodně prezentované řadou průměrných hodinových průtoků.

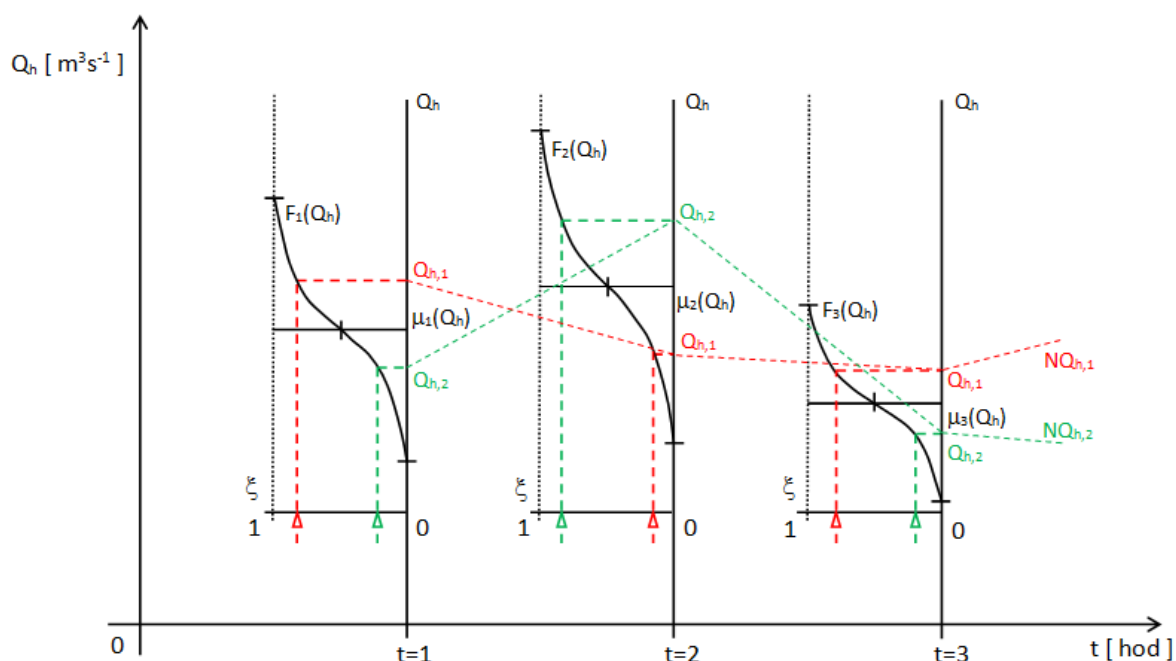
*Pro vytvoření algoritmu generujícího náhodné průtokové řady zatížené nejistotami z měření reálné průtokové řady průměrných hodinových průtoků bylo zapotřebí uvažovat následující předpoklady řešení:*

- *Hodnoty průměrných hodinových průtoků  $Q_h$  reálné průtokové řady považujeme za náhodné (stochastické) veličiny, což umožní generovat nové hodnoty náhodných průměrných hodinových průtoků v okolí reálné hodnoty průtoků  $Q_h$  jako zcela náhodné a na sobě nezávislé realizace průměrných hodinových průtoků.*
- *Náhodné veličiny jsou tedy výslednicí většího počtu vzájemně nezávislých náhodných jevů. Tento předpoklad umožní popsat hodnotu průměrného hodinového průtoků pomocí odpovídajícího normálního rozdělení pravděpodobnosti  $N(\mu(Q_h), \sigma(Q_h))$ . Předpoklad zavedené funkce normální hustoty pravděpodobnosti umožňuje zadávat v okolí výsledné hodnoty průměrného hodinového průtoků  $Q_h$  náhodné veličiny pomocí střední hodnoty  $\mu(Q_h) = \text{naměřená hodnota } Q_h$  a směrodatné odchylky  $\sigma(Q_h) = \text{standardní nejistota } u_{Q_h}$ .*
- *Maximální hranici výskytu náhodně generovaných hodnot průměrných hodinových průtoků definuje hodnota rozšířené nejistoty měření  $U_{a,Q_h}$ .*
- *Při výpočtu je uvažováno pouze se standardní nejistotou měření typu B  $u_{B,Q_h}$ .*
- *Pro jednoduchost je standardní nejistota  $u_{B,Q_h}$  zavedena pomocí relativní hodnoty koeficientu variace  $C_v(Q_h)$ . Výsledná směrodatná odchylka  $\sigma(Q_h)$  je následně v použitých algoritmech dopočítána pomocí odpovídajících matematických vztahů.*

*Základem řešení generátoru náhodných reálných průtokových řad je opětovné použití metody Monte Carlo. Pomocí generátoru náhodných čísel a příslušných distribučních křivek jsou opakovaně generovány náhodné průběhy reálné průtokové řady průměrných hodinových průtoků, dané příslušnými náhodně vygenerovanými realizacemi  $Q_{h,j}$  pro  $j = 1, 2, \dots, PO$ , kde  $PO$  je počet generování v jednotlivých hodinách.*

Každé hodině reálné průtokové řady odpovídá distribuční křivka, která je určena normálním rozdělením  $N(\mu_i(Q_h), \sigma_i(Q_h))$ , pro  $i = 1, 2, \dots, n$ , kde  $n$  je počet měsíců v řadě. Opakovaně náhodně generované průběhy reálné průtokové řady jsou označeny jako  $NQ_{h,j}$ , pro  $j = 1, 2, \dots, PO$ , kde  $PO$  je počet opakování. Princip generování náhodných řad je znázorněn na schématu, Obrázek 5 [19].

Výstupní náhodně generované reálné průtokové řady průměrných hodinových průtoků  $NQ_{h,j}$  se jednak stávají vstupním podkladem pro generátory umělých průtokových řad, ale jsou také použity pro řešení zásobního objemu nádrže metodou postupně bilanční. Jejím zpracováním následně dostaneme výběr náhodných realizací zásobního objemu  $NV_{z,j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, PO$ , kde  $PO$  je počet opakování. Vektor náhodných realizací zásobního objemu nádrže je zpracován do hledaných statistických charakteristik.



**Obrázek 5** - Schéma generování náhodných průtokových řad průměrných hodinových průtoků metodou Monte Carlo

Postup generování náhodných reálných průtokových řad průměrných hodinových průtoků:

1. Sestavení linearizovaného průběhu distribuční funkce  $F(Q_m)$  normovaného normálního rozdělení  $N(0,1)$ .
2. Generátorem pseudonáhodných čísel  $\xi$  jsou vytvářeny náhodné hodnoty  $\xi_j$  z intervalu  $\xi \in \langle 0,1 \rangle$ .
3. Z distribuční funkce normálního normovaného rozdělení  $N(0,1)$  jsou pro hodnoty  $\xi_j$  opakovaně stanoveny náhodné parametry  $\eta_j$ , pro  $j = 1, 2, \dots, PO$ .

4. Vypočet náhodné realizace průměrného hodinového průtoku reálné průtokové řady  $Q_{h,i}$  pro  $i = 1, 2, \dots, n$ , kde  $n$  je počet členů reálné průtokové řady, stanovíme vztahem (14).

$$Q_{h,j} = \sigma_i(Q_h) \cdot \eta_j + \mu_i(Q_h), \quad (14)$$

kde ve vztahu (16)  $\mu_i(Q_h)$  odpovídá hodnotě průměrného hodinového průtoku  $Q_h$  (střední hodnotě) reálné průtokové řady a směrodatná odchylka  $\sigma_i(Q_h)$  je zadána vztahem (15).

$$\sigma_i(Q_h) = C_v(Q_h) \cdot Q_{h,i}. \quad (15)$$

Vztah (16) provede transformaci náhodné realizace  $\eta_j$  z rozdělení  $N(0,1)$  na realizace náhodné veličiny  $Q_{h,j}$  z rozdělení  $N(\mu_i(Q_h), \sigma_i(Q_h))$ .

## 4.2 Simulační model zásobního objemu nádrže UNCE\_RESERVOIR

Základ výpočtu zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot vychází ze softwaru UNCE\_RESERVOIR.

Program UNCE\_RESERVOIR slouží k výpočtům zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže a nejistot parametrů vstupujících do řešení. Úloha vychází z řešení základní rovnice nádrže v součtovém tvaru, kdy podstatou úlohy je výpočet maximálního zásobního objemu nádrže při 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže a úloha kdy je stanovena zabezpečení podle trvání a množství nedodané vody pro známé hodnoty nalepšeného odtoku a zásobního objemu. Základem výpočtů je jednorůchodová simulace provozu nádrže. Řešení uvažuje ztráty vody z nádrže, ale také nejistoty všech vstupujících parametrů do výpočtu. Výsledkem výpočtů jsou jednak velikosti zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát a bez uvažování ztrát vody z nádrže, ale také hodnoty objemu nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat. [6]

### 4.2.1 Úloha typu $V_z(O_p; P)$ pro $P = 100\%$

Jedná se o úlohu, kdy zásobní objem nádrže je funkcí nalepšeného odtoku a současně i sto procentní zabezpečení.

Pro výpočet velikosti zásobního objemu nádrže byla použita úloha  $V_z(O_p, P)$  pro  $P = 100\%$ . Výsledkem úlohy je hodnota zásobního objemu  $V_z$ , při zadaném nalepšeném odtoku z nádrže  $O_p$  a požadované sto procentní zabezpečení nádrže  $P$ . Řešení úlohy vychází ze základní rovnice nádrže v součtovém tvaru (16).



$$V_n = V_0 + \sum_{i=0}^n (Q_i - O_i(V_i)) \cdot \Delta t_i. \quad (16)$$

Úloha vychází z jednorůchodové simulace provozu nádrže v příslušném časovém období, které zpravidla limituje délka vstupní průtokové řady.

Na základě popsaného postupu sestavení generátoru náhodných reálných a náhodných umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků včetně vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže byl sestaven algoritmus. [5, s. 29]

Úloha se provádí ve variantě simulací provozu nádrže. Řešení této úlohy je vhodné provést tabelárně pro časové období jednoho měsíce, tj. 2 630 000 s. Výstupy řešení mohou být jak početní, tak grafické. Početní řešení poskytují přesnější výsledky oproti grafickým. Výhoda grafických výstupů je v jejich přehlednosti. Cílem této úlohy je stanovení maximálního zásobního objemu ve vodném období a stavu, ve kterém dochází k prázdnění nádrže. V prvním případě platí, že  $Q > O_p$ , ve druhém pak platí, že  $Q < O_p$ . Změna prázdnění nádrže na konci každého měsíce je získána tak, že dílčí bilanci mezi požadovaným odtokem a přiteklym objemem vody přičteme ke stavu prázdnění na konci předchozího měsíce. [14, s. 52] V případě plné nádrže a podmínky  $Q > O_p$ , je nutno zvýšit skutečný odtok oproti předběžnému plánu.

#### 4.2.2 Úloha typu P ( $O_p$ ; $V_z$ )

Jedná se o úlohu, kdy zabezpečení nádrže je funkcí nalepšeného odtoku a současně i daného zásobního objemu.

Základem simulačního modelu nádrže je upravená rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (17) [14],

$$0 \leq \sum_{i=0}^k (O_i - Q_i) \Delta t + (O_{i+1} - Q_{i+1}) \Delta t \leq V_{z,max} \quad (17)$$

kde  $O_i$  je odtok vody z nádrže,  $Q_i$  přítok vody do nádrže pro  $i = 1, \dots, n$ ,  $\Delta t$  je časový krok výpočtu (jeden měsíc).  $O_{k+1}$  je odtok vody z nádrže v následujícím časovém kroku, kdy v kroku  $i+1$  je hodnota  $O_{i+1}$  nejdříve nahrazena hodnotou požadovaného nalepšeného odtoku  $O_p$ . Časový průběh vyčíslované sumy simuluje průběh prázdnění zásobního objemu nádrže po časových krocích  $i = 1, \dots, k$ . Pro  $i = 0$  je třeba za hodnotu sumy zadat počáteční podmínku řešení. Nerovnost (17) je zleva i zprava omezená. Z levé strany je omezena hodnotou 0 (plný zásobní objem) a z pravé strany hodnotou  $V_{z,max}$  (prázdný zásobní objem) charakterizující

zásobní objem nádrže, který je pro nádrž  $k$  dispozici. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění zásobního objemu  $V'_{z,i+1}$ , které je následně testováno, zda leží v daném intervalu  $(0, V_{z,max})$ . Pokud ne, je třeba nalézt hodnotu  $O_{i+1}$  (položít výraz v suma rovný nule – vznikne jalový odtok, nebo rovný  $V_{z,max}$  – vznikne porucha). Klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže je následující (18).

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i > O_p \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_p \end{cases} \quad (18)$$

$Z_{t,i} = 1$  popisuje stav zásobního objemu nádrže v bezporuchovém (vyhovujícím) časovém kroku výpočtu.  $Z_{t,i} = 0$  popisuje stav zásobního objemu nádrže v poruchovém (nevyhovujícím) časovém kroku výpočtu. Z hodnot  $Z_{t,i}$  je možno dále dopočítat požadovanou zabezpečení. Obecně se počítá jako zabezpečení podle opakování, doby trvání a množství nedodané vody. V článku je použit vzorec pro výpočet zabezpečení podle trvání  $P_T$  (19).

$$P_T = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Z_{t,i} \quad (19)$$

kde  $k$  je počet všech měsíců vstupní časové řady.  $\sum_{i=1}^k Z_{t,i}$  součet záznamů poruchových a bezporuchových měsíců. [7, s. 3, 4]

Postup této úlohy je opět ve formě simulace provozu nádrže. Jedná se o úlohu, kdy zabezpečení nádrže je funkcí nalepšeného odtoku a zásobního objemu. Stejně jako v případě první úlohy je vhodné řešit úlohu tabelárně. Počáteční podmínkou je plná nádrž na začátku řešeného období. Postup úlohy probíhá obdobně. Změna je v tom, že navíc testujeme, zda na konci každého měsíce nepřesahuje nárok na vyprázdnění nádrže zadaný zásobní objem. Pokud vychází na konci libovolného měsíce poměrné povyprázdnění větší než zadaný poměrný zásobní objem, píšeme jej v takovém měsíci rovné  $V'_z$ . [14, s. 53] Porucha v dodávce vody z nádrže nastane v měsících, kde při vyhodnocení platí, že  $0 < O_p$ . Následně vypočteme celkové množství nedodané vody oproti plánované hodnotě. Konečným krokem je pak stanovení zabezpečení podle opakování, trvání a dodávky vody.

### 4.3 Srážkoodtokový MODEL HYDROG

Pro výpočet retenčního objemu nádrže byl použit program HYDROG. Srážkoodtokový model HYDROG (popsáno v práci *Stary, 2017*) [17] slouží pro simulaci, operativní předpovědi a operativní řízení odtoku vody z povodí s nádržemi za povodňových situací. V praxi bývá používán ve velmi širokém rozpětí ploch modelovaných povodí, a to jak pro letní povodně, tak i pro zimní způsobené táním sněhové pokrývky. Pro vybrané profily říční sítě je spuštěn algoritmus předpovědního modelu. Vyžaduje čísla úseků, ve kterých jsou měřeny průtoky a evidovány výsledky pro výpis i následné grafické zobrazení. Následně je spuštěna simulace chování systému v předchozím období, kde je důležité zadat průběhy srážek ve srážkoměrných stanicích a průběhy řízených odtoků z nádrží. Ve výpočtu současně platí předpoklad, že proudění je ustálené. Simulace je ukončena v okamžiku, kdy už nejsou známy průběhy průtoků a stavy hladin v nádržích. Po ukončení simulace lze ještě zkorigovat stavové veličiny měření, čímž může dojít k eliminaci značného množství chyb, které doposud ovlivňovaly přesnost výpočtu. Pro transformaci povodně (řešení základní rovnice nádrže v diferenciálním tvaru) je v programu použita explicitní diferenční metoda Runge-Kutta 4. Řádu. Metoda umožňuje provádět diskrétní bodovou simulaci spojitého procesu.

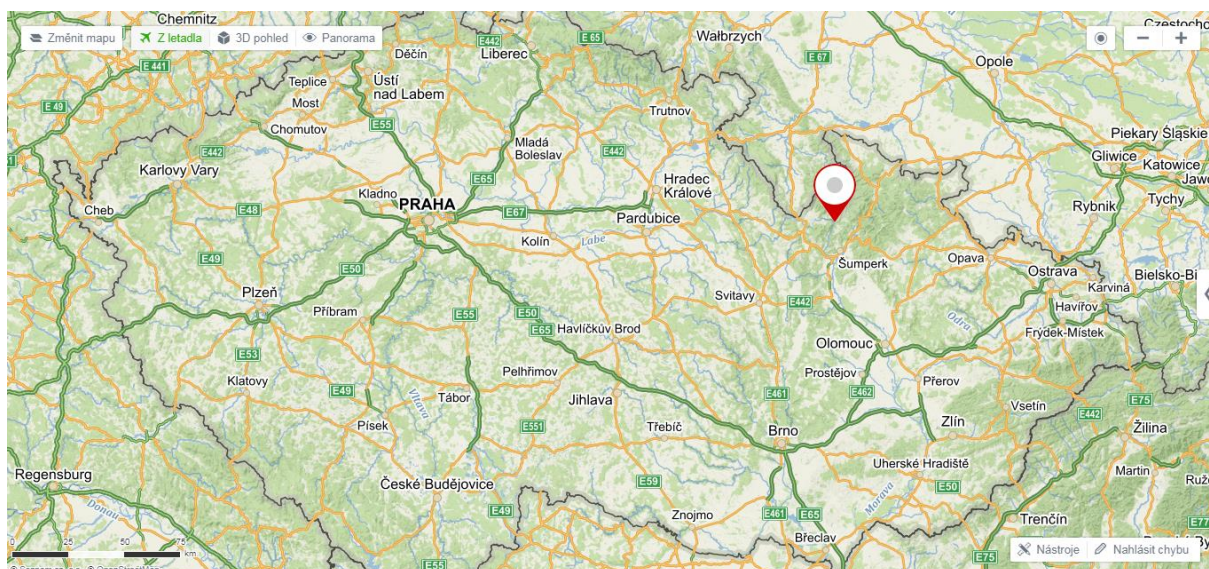
V praxi bývá model využíván v provozním režimu na ČHMÚ, pobočkách v Ostravě a v Brně, dále pak na Povodí Odry, Povodí Labe. Postupně se zavádí i na Povodí Ohře a Povodí Vltavy, na Povodí Moravy se připravuje uvedení do provozu.

## 5. PRAKTICKÁ APLIKACE

Podrobnější analýza vlivu nejistot byla provedena na navrhované vodní nádrži Hanušovice. Nádrž je navržena v oblasti správy Povodí Moravy, s.p.

### 5.1 Popis území

Hanušovice se nachází v Olomouckém kraji, okres Šumperk a přibližně 15 km severně od Šumperka. Městem protéká řeka Morava, do které se ve městě vlévá říčka Branná. Oblast byla vytipovaná a vybrána jako vhodná pro umístění vodní nádrže. Je zapsaná v *Generelu území chráněných pro akumulaci povrchových vod*, kde je podrobněji popsána. Ve městě je veškerá důležitá infrastruktura, tj. mateřská i základní škola, kino, dům kultury, pošta, ČOV. Na levém břehu říčky je vedena železniční trať, silnice II. / 446, na pravém břehu je pak kamenolom (viz *Obrázek 10*), který je důležitý pro průmysl v posuzované oblasti.

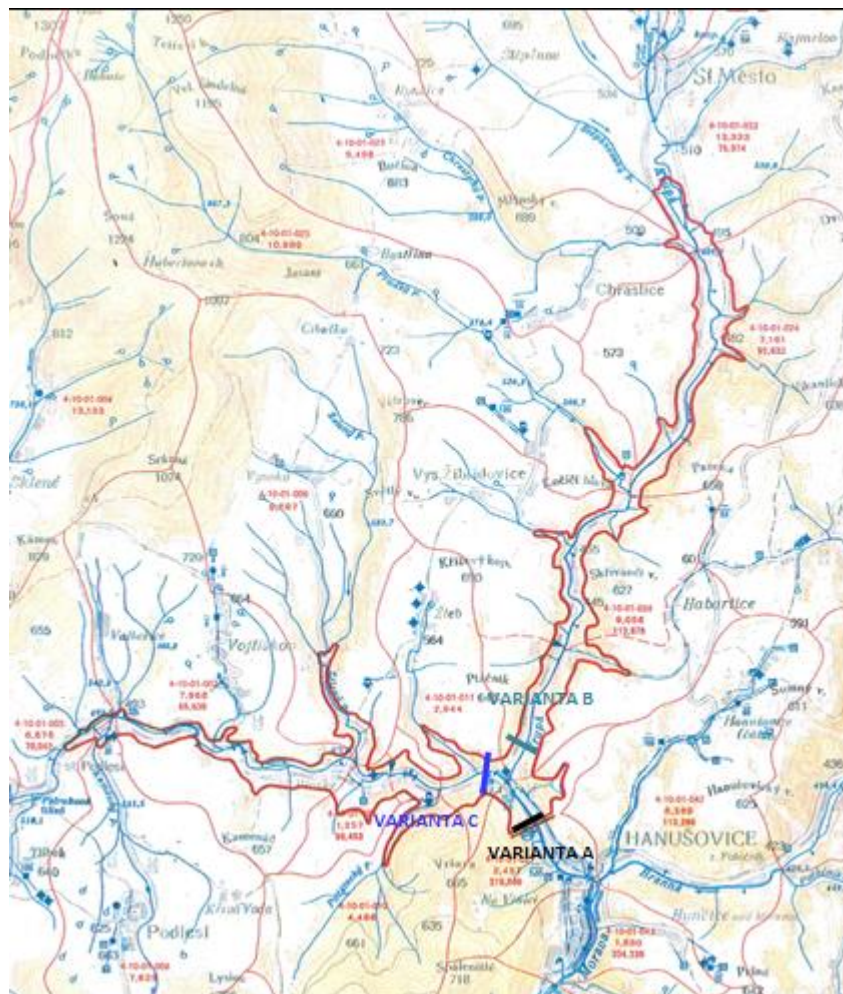


**Obrázek 6 - Geografická poloha v ČR (zdroj: [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz))**

#### 5.1.1 Informace a technické údaje

Posuzovaná nádrž je ve fázi přípravné studie. Byly navrženy tři varianty umístění závěrového profilu nádrže (viz *Obrázek 9*). První varianta je pod soutokem Moravy a Krupé, druhá na toku Krupá těsně nad soutokem s Moravou a třetí na řece Moravě. Z výstupů uvedených v bakalářské práci [3] jsem se snažil vyhodnotit nejlepší a nejpříjemnější variantu umístění profilu. Podle podkladů byla vyhodnocena jako nejlepší varianta B, tedy na řece Krupé (viz *Obrázek 9*). Objemy deterministického řešení nádrže byly v bakalářské práci [3] vypočteny následovně: mrtvý prostor  $485,25 \text{ m}^3$ , prostor stálého nadržení  $2\,796\,360 \text{ m}^3$  a zásobní prostor  $21\,000\,000 \text{ m}^3$ . Tyto hodnoty jsem stanovil při součiniteli nalepšení  $\alpha = 0,7$

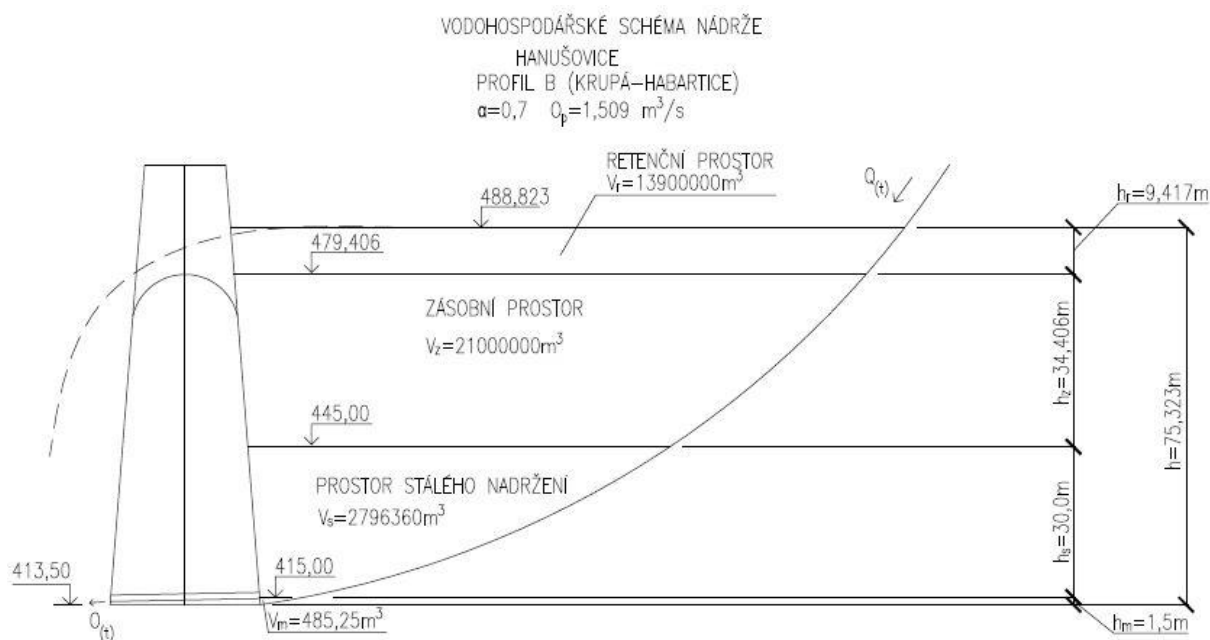
a nalepšeným odtokem  $O_p=1,509 \text{ m}^3/\text{s}$ . Jednotlivé prostory i s jejich nadmořskými výškami jsou vykresleny ve zjednodušeném schématu (viz Obrázek 11)



Obrázek 7 - Varianty umístění profilu nádrže



Obrázek 8 - Morfologie varianty B (zdroj: [www.google.cz/maps](http://www.google.cz/maps))



Obrázek 9 - Zjednodušené schéma prostorů vodní nádrže varianty B)

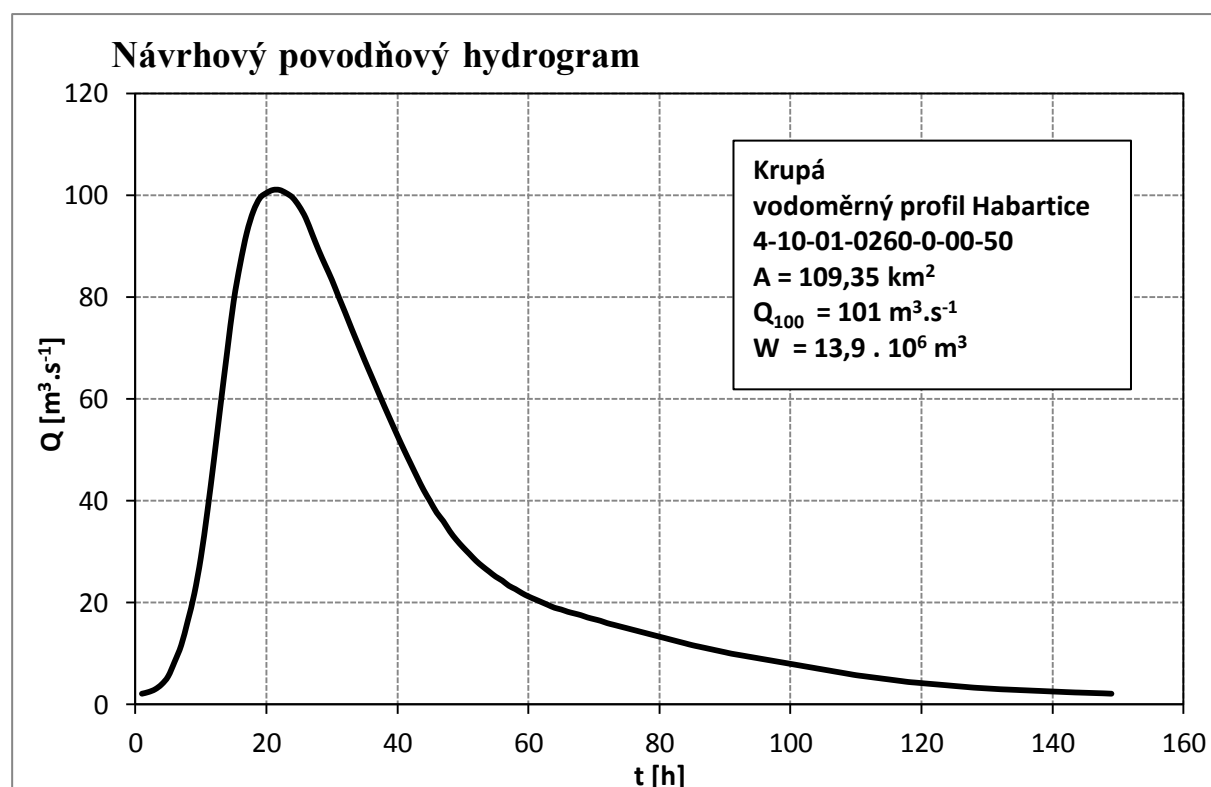
## 5.2 VSTUPNÍ HODNOTY DO VÝPOČTŮ

Jako vstupní hodnoty pro simulaci objemu nádrže byla použita průtoková řada z měrné stanice Habartice. Řada byla měřená od roku 1950 do roku 2014. Tento podklad poskytl ČHMÚ, konkrétně pobočka Ostrava, která zpracovává a vyhodnocuje tyto údaje z dané oblasti. Dalšími vstupními daty byly podklady převzaté z posudku na vodní dílo Hanušovice,

jež byl zpracován v práci (Marton, 2016) [4]. Jednalo se o hodnoty kulminačních průtoků při průchodu  $Q_{1000}$  a  $Q_{10000}$  posuzovanou oblastí.

**Tabulka 1 - N-leté průtoky - Krupá**

N-leté	$m^3/s$
1	14.1
5	33.4
10	45.2
50	81.1
100	101
1000	168
10000	245



**Obrázek 10 - Návrhový povodňový hydrogram - Habartice**

Dalšími vstupními daty byly batygrafické čáry vygenerované z ČÚZK. Z těchto čar byly stanoveny objemy a plochy zatopení.

Hodnota výparu se stanovuje v závislosti na nadmořské výšce vodní hladiny a teplotě. Na území České republiky je výpar v rozmezí přibližně 1-3 mm za den a 200-800 mm za rok. Nadmořská výška vodní hladiny zásobního objemu je 479,406 m n. m., z toho vyplývá i celkový výpar, který je roven hodnotě 700 mm. Podle ČSN 75 2405 *Vodohospodářská*

řešení vodních nádrží [1] je vypočtena hodnota výparu pro jednotlivé měsíce v roce následovně:

**Tabulka 2 - Měsíční rozdělení výparu**

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K [%]	1	2	6	9	12	14	16	15	11	7	5	2
E [mm]	7	14	42	63	84	98	112	105	77	49	35	14

Průsak byl do výpočtu odhadnut dle velikostí podobných nádrží, které byly v minulosti takto navrženy a také zrealizovány. Hodnota průsaku byla odhadnuta na 0,01 l/s, avšak tato hodnota neměla do výsledků výrazný vliv a pro samotný návrh je zanedbatelná.

### 5.3 VÝPOČET ZÁSOBNÍHO OBJEMU NÁDRŽE

Výpočet zásobního objemu byl proveden v programu UNCE\_RESERVOIR. Hlavními podklady pro určení zásobního objemu jsou batygrafické čáry a průtoková řada pro daný profil nádrže. Dále pak byly zadány velikost průsaku, výparu, nalepšeného odtoku a odhadované rozměry nádrže. K jednotlivým podkladům byly přiřazeny velikosti nejistot, které tyto podklady znehodnocovaly nebo nadlepšovaly. Všechny nejistoty byly zadávány a uvažovány v procentech. Popis variant a jednotlivé ovlivnění je v *Tabulce 3*:

**Tabulka 3 - Uvažované varianty nejistot na zásobním objemu  $V_z$**

i	přítok	BK	výpar
	%	%	%
1	5	5	5
2	10	10	10
3	1	5	1
4	5	10	5
5	10	15	10
6	5	5	1
7	1	5	5
8	10	5	1
9	10	15	5
10	1	10	10
11	1	5	-
12	5	5	-
13	10	5	-
14	5	10	-
15	5	15	-
16	10	10	-
17	10	15	-
18	1	-	-



i	přítok	BK	výpar
	%	%	%
19	5	-	-
20	10	-	-
21	-	15	-
22	1	-	1
23	1	-	5
24	1	-	10
25	10	-	10
26	-	-	5
27	-	-	1
28	-	-	10
29	-	5	1
30	-	15	10
31	-	5	-
32	-	10	-

### 5.3.1 Úloha typu $V_z$ ( $O_p$ ; $P$ ) pro $P=100$ %

Výstupem výpočtu zásobního objemu  $V_z$  jsou statistické charakteristiky popisující možný rozsah, který je ovlivňován velikostí nejistot zatěžující vstupní data. V *Tabulce 4* jsou uvedeny střední hodnoty  $\mu(V_z)$ , směrodatné odchylky  $\sigma(V_z)$  a koeficient variace  $c_v$ .

**Tabulka 4** - Statistické charakteristiky výpočtu zásobního objemu  $V_z$  v UNCE RESERVOIR

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$c_v$	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$c_v$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	-
1	22 041 464	646 011	0.0293	21 313 192	542 759	0.0255
2	22 507 944	1 135 966	0.0505	21 801 584	1 015 679	0.0466
3	21 830 928	174 967	0.0080	21 001 292	142 439	0.0068
4	22 041 944	645 094	0.0293	21 313 192	542 759	0.0255
5	22 506 662	1 134 634	0.0504	21 801 584	1 015 679	0.0466
6	22 043 738	647 703	0.0294	21 313 192	542 759	0.0255
7	21 828 724	178 362	0.0082	21 001 292	142 439	0.0068
8	22 513 296	1 140 051	0.0506	21 801 584	1 015 679	0.0466
9	22 509 496	1 135 812	0.0505	21 801 584	1 015 679	0.0466
10	21 825 686	194 200	0.0089	21 001 292	142 439	0.0068
11	21 831 080	178 566	0.0082	21 001 292	142 439	0.0068
12	22 044 328	648 335	0.0294	21 313 192	542 759	0.0255
13	22 513 914	1 140 629	0.0507	21 801 584	1 015 679	0.0466
14	22 044 792	647 350	0.0294	21 313 192	542 759	0.0255
15	22 043 994	645 502	0.0293	21 313 192	542 759	0.0255
16	22 513 764	1 139 409	0.0506	21 801 584	1 015 679	0.0466
17	22 512 546	1 138 314	0.0506	21 801 584	1 015 679	0.0466

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$c_v$	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$c_v$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	-
18	21 833 954	174 754	0.0080	21 001 292	142 439	0.0068
19	22 046 326	650 220	0.0295	21 313 192	542 759	0.0255
20	22 516 006	1 142 107	0.0507	21 801 584	1 015 679	0.0466
21	21 783 290	67 493	0.0031	20 979 548	38	0
22	21 789 680	173 947	0.0080	21 001 292	142 439	0.0068
23	21 787 626	176 965	0.0081	21 001 292	142 439	0.0068
24	21 785 176	188 394	0.0087	21 001 292	142 439	0.0068
25	22 478 448	1 131 522	0.0503	21 801 584	1 015 679	0.0466
26	21 785 514	40 229	0.0019	20 979 548	38	0
27	21 787 632	8 046	0.0004	20 979 548	38	0
28	21 782 930	80 452	0.0037	20 979 548	38	0
29	21 785 830	23 676	0.0011	20 979 548	38	0
30	21 777 822	104 084	0.0048	20 979 548	38	0
31	21 786 376	22 315	0.0010	20 979 548	38	0
32	21 785 698	45 386	0.0021	20 979 548	38	0

V jednotlivých tabulkách index  $i$  značí variantu řešení výpočtu dané veličiny.

Nejvyšších hodnot bylo dosahováno při určení nejistot na přítoku v hodnotě 10 %. Velikost zásobního objemu se při ovlivnění 10 % na přítoku pohybovala kolem hodnoty 22 500 000 m<sup>3</sup>, což je zhruba o 1 500 000 m<sup>3</sup> vyšší, než při výpočtu v programu ZFN. Tento výpočet je uveden v bakalářské práci [3], jejíž řešením nebyla analýza a stanovení objemu retenčního prostoru. Maximální zásobní objem byl ve variantě č. 20 (přítok 10 %, BK 0 %, výpar 0 %) a to 22 516 006 m<sup>3</sup>.

Při stanovení nejistot na přítoku do nádrže na 0 % a 1 % byl zásobní objem naopak nejmenší, přibližně 21 800 000 m<sup>3</sup>. Minimální hodnota byla při variantě č. 30 (přítok 0 %, BK 15 %, výpar 10 %) a to přesně 21 777 882 m<sup>3</sup>. Jednotlivé výpočty jsou složeny z tří set opakování výpočtu. Průměrná hodnota zásobního objemu  $V_z$  se započítáním ztrát je 22 052 082 m<sup>3</sup> a její směrodatná odchylka se pak rovná 301 156 m<sup>3</sup>. V případě neuvažování ztrát se střední hodnota zásobního objemu  $V_z$  rovná 21 289 166 m<sup>3</sup> a její směrodatná odchylka 344 468 m<sup>3</sup>.

**Tabulka 5** – Horní a dolní mez zásobních objemů  $V_z$  při  $Q_{100}$

i	se ztrátami		bez ztrát	
	$V_{z+}$	$V_{z-}$	$V_{z+}$	$V_{z-}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
1	23 979 497	20 103 431	22 941 469	19 684 915
2	25 915 841	19 100 047	24 848 621	18 754 547
3	22 355 829	21 306 027	21 428 609	20 573 975

i	se ztrátami		bez ztrát	
	$V_{z+}$ $m^3$	$V_{z-}$ $m^3$	$V_{z+}$ $m^3$	$V_{z-}$ $m^3$
4	23 977 226	20 106 662	22 941 469	19 684 915
5	25 910 563	19 102 762	24 848 621	18 754 547
6	23 986 848	20 100 628	22 941 469	19 684 915
7	22 363 810	21 293 638	21 428 609	20 573 975
8	25 933 450	19 093 142	24 848 621	18 754 547
9	25 916 931	19 102 062	24 848 621	18 754 547
10	22 408 286	21 243 086	21 428 609	20 573 975
11	22 366 778	21 295 382	21 428 609	20 573 975
12	23 989 334	20 099 322	22 941 469	19 684 915
13	25 935 800	19 092 028	24 848 621	18 754 547
14	23 986 841	20 102 743	22 941 469	19 684 915
15	23 980 501	20 107 487	22 941 469	19 684 915
16	25 931 991	19 095 537	24 848 621	18 754 547
17	25 927 487	19 097 605	24 848 621	18 754 547
18	22 358 216	21 309 692	21 428 609	20 573 975
19	23 996 985	20 095 667	22 941 469	19 684 915
20	25 942 326	19 089 687	24 848 621	18 754 547
21	22 041 804	21 614 124	20 979 662	20 979 434
22	22 311 521	21 267 839	21 428 609	20 573 975
23	22 318 522	21 256 730	21 428 609	20 573 975
24	22 350 359	21 219 993	21 428 609	20 573 975
25	25 873 014	19 083 882	24 848 621	18 754 547
26	21 906 200	21 664 828	20 979 662	20 979 434
27	21 811 770	21 763 494	20 979 662	20 979 434
28	22 024 287	21 541 573	20 979 662	20 979 434
29	21 856 859	21 714 801	20 979 662	20 979 434
30	22 090 073	21 465 571	20 979 662	20 979 434
31	21 853 320	21 719 432	20 979 662	20 979 434
32	21 921 855	21 649 541	20 979 662	20 979 434
$\mu(V_z)$	23 610 129	20 496 826	22 609 189	19 969 144

Hodnoty v *Tabulce 5* jsou vypočteny ze vztahu (21), kdy ke střední hodnotě zásobního objemu byl přičten ( $V_{z+}$ ), resp. odečten ( $V_{z-}$ ) trojnásobek směrodatné odchylky.

$$V_z = \mu(V_z) \pm 3\sigma(V_z) \quad (21)$$

Tím je pokryt rozsah pravděpodobnosti velikosti zásobního objemu podle normálního Laplaceova rozdělení. Rozdělení se ztrátami se pohybuje v rozmezí hodnot 19 089 687 m<sup>3</sup> a 25 942 326 m<sup>3</sup>. Bez ztrát se objemy pohybují v rozmezí od 18 754 547 m<sup>3</sup> do 24 848 621 m<sup>3</sup>.

### 5.3.1.1 Závislost $O_p$ na $V_z$

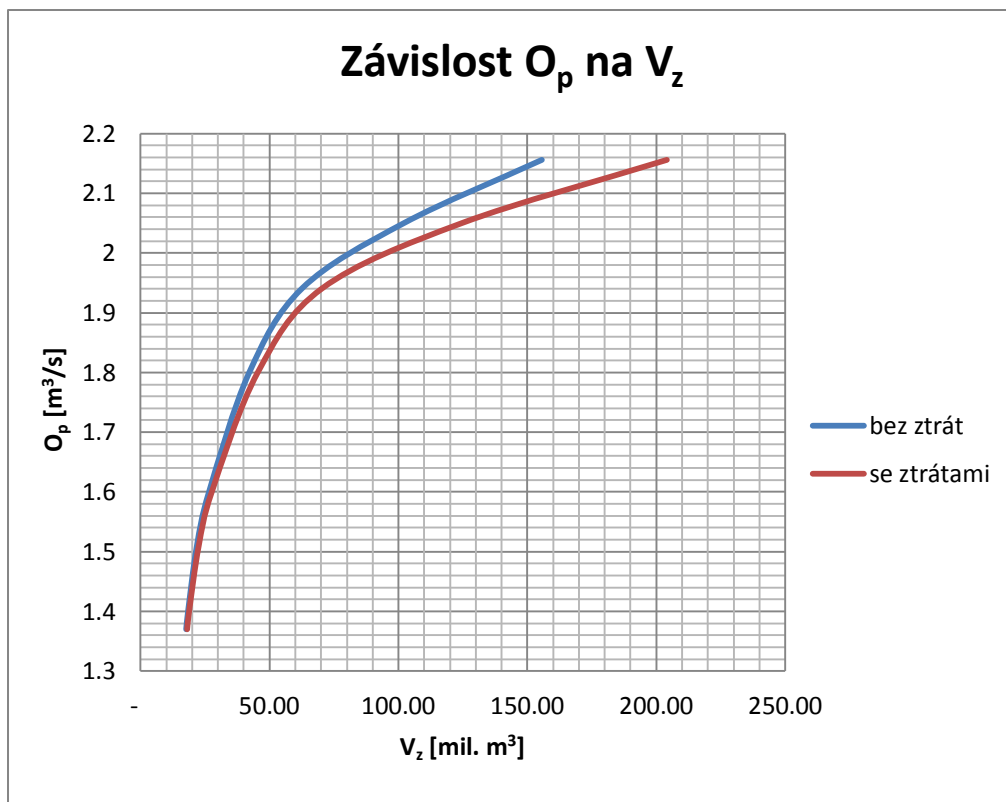
Ve výpočtech byla dále porovnána možnost změny nalepšeného odtoku  $O_p$  a součinitele nalepšení  $\alpha$ . Pro reálný návrh je  $\alpha$  nejčastěji právě v rozmezí 0,6-0,8. Zároveň platí, že se zvyšujícím se součinitelem nalepšení odtoku se výrazně zvyšuje i velikost zásobního objemu.

#### 5.3.1.1.1 Maximální hodnoty zásobního objemu

Porovnány byly varianty nejistot, u kterých hodnoty zásobního objemu (viz *Tabulka 4*) nabývaly maxima. V tomto případě se jednalo o variantu č. 20 (maximum). Velikost součinitele nalepšení  $\alpha$  se pro výpočet pohybovala v rozmezí od 0,64 do 1,00.

**Tabulka 6** - Závislost  $O_p$  na  $V_z$  - při max  $V_z$

Úloha typu $V_z$ ( $O_p$ ; $P=100\%$ )			
$\alpha$	$O_p$	se ztrátami	bez ztrát
-	$m^3/s$	$m^3$	$m^3$
1	2.156	204 090 032	155 606 160
0.95	2.05	124 509 632	102 066 640
0.9	1.941	70 464 272	62 665 988
0.84	1.8	45 421 688	42 131 148
0.74	1.6	27 610 614	26 530 400
0.7	1.509	22 516 006	21 801 584
0.65	1.4	18 814 620	18 404 194
0.64	1.37	18 047 492	17 671 240



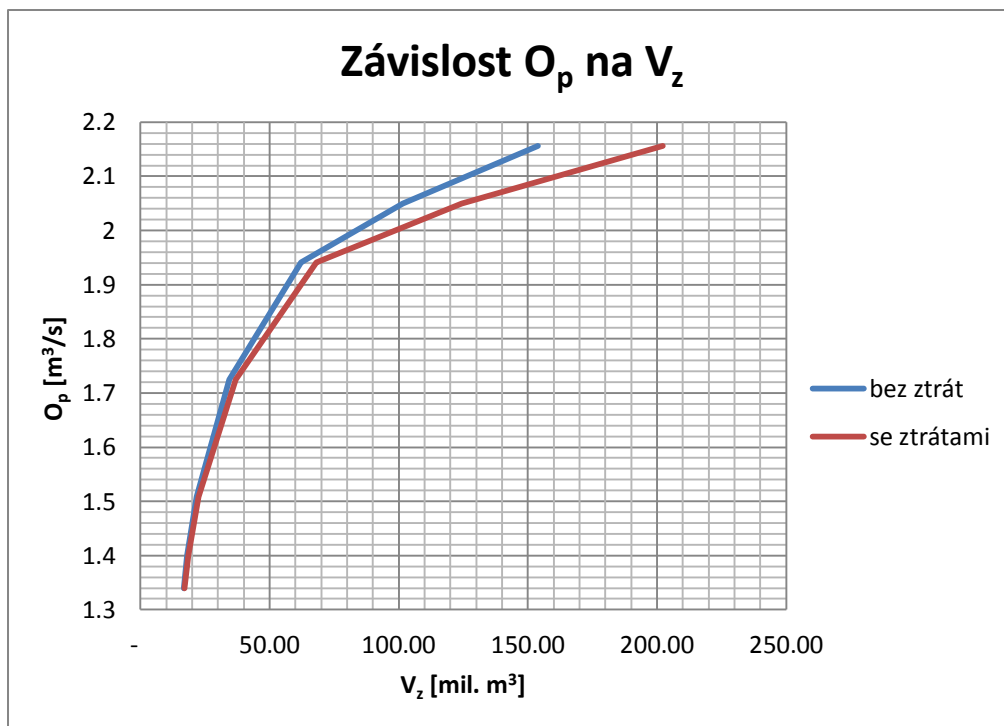
**Graf 1** - Závislost  $O_p$  na  $V_z$  při max  $V_z$

#### 5.3.1.1.2 Minimální hodnoty

Porovnány byly varianty nejistot, u kterých hodnoty zásobního objemu (viz *Tabulka 4*) nabývaly minima. V tomto případě se jednalo o variantu č. 30 (minimum). Velikost součinitele nalepšení  $\alpha$  se pro výpočet pohybovala v rozmezí od 0,62 do 1,00.

**Tabulka 7** - Závislost  $O_p$  na  $V_z$  - při min  $V_z$

Úloha typu $V_z$ ( $O_p$ ; $P=100\%$ )			
$\alpha$	$O_p$	se ztrátami	bez ztrát
-	$m^3/s$	$m^3$	$m^3$
1	2.156	202 230 544	153 986 272
0.95	2.05	124 264 368	101 576 232
0.9	1.941	68 060 888	62 104 876
0.8	1.725	36 906 528	34 279 504
0.7	1.509	21 777 822	20 979 548
0.65	1.4	18 402 216	17 962 958
0.62	1.34	16 903 232	16 658 430



Graf 2 - Závislost  $O_p$  na  $V_z$  při min  $V_z$

### 5.3.2 Úloha typu P ( $O_p$ ; $V_z$ )

Výstupem výpočtu zabezpečení nádrže jsou statistické charakteristiky popisující možný rozsah, který je ovlivňován velikostí nejistot zatěžující vstupní data. V *Tabulce 8* jsou uvedeny střední hodnoty  $\mu(P)$ , směrodatné odchylky  $\sigma(P)$  a koeficient variace  $c_v$ .

**Tabulka 8** - Statistické charakteristiky výpočtu zabezpečení podle trvání  $P_t$  v UNCE RESERVOIR

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(P_i)$	$\sigma(P_i)$	$c_v$	$\mu(P_i)$	$\sigma(P_i)$	$c_v$
	%	%	-	%	%	-
1	99.747	0.133	0.0013	99.890	0.063	0.0006
2	99.771	0.160	0.0016	99.864	0.101	0.0010
3	99.665	0.027	0.0003	99.912	0.000	0.0000
4	99.746	0.131	0.0013	99.890	0.063	0.0006
5	99.770	0.159	0.0016	99.864	0.101	0.0010
6	99.747	0.131	0.0013	99.890	0.063	0.0006
7	99.667	0.032	0.0003	99.912	0.000	0
8	99.771	0.166	0.0017	99.865	0.100	0.0010
9	99.773	0.160	0.0016	99.864	0.101	0.0010
10	99.673	0.046	0.0005	99.912	0.000	0
11	99.664	0.026	0.0003	99.912	0.000	0
12	99.747	0.132	0.0013	99.890	0.063	0.0006
13	99.772	0.166	0.0017	99.865	0.100	0.0010
14	99.746	0.132	0.0013	99.890	0.062	0.0006
15	99.745	0.132	0.0013	99.890	0.063	0.0006

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(P_i)$	$\sigma(P_i)$	$c_v$	$\mu(P_i)$	$\sigma(P_i)$	$c_v$
	%	%	-	%	%	-
16	99.771	0.165	0.0017	99.865	0.100	0.0010
17	99.772	0.163	0.0016	99.865	0.100	0.0010
18	99.663	0.020	0.0002	99.912	0.000	0
19	99.749	0.133	0.0013	99.890	0.062	0.0006
20	99.771	0.165	0.0017	99.865	0.100	0.0010
21	99.662	0.018	0.0002	99.912	0.000	0
22	99.662	0.018	0.0002	99.912	0.000	0
23	99.663	0.024	0.0002	99.912	0.000	0
24	99.668	0.036	0.0004	99.912	0.000	0
25	99.768	0.167	0.0017	99.864	0.101	0.0010
26	99.660	0.000	0	99.912	0.000	0
27	99.660	0.000	0	99.912	0.000	0
28	99.660	0.007	0.0001	99.912	0.000	0
29	99.660	0.000	0	99.912	0.000	0
30	99.665	0.035	0.0004	99.912	0.000	0
31	99.660	0.000	0	99.912	0.000	0
32	99.660	0.007	0.0001	99.912	0.000	0

**Tabulka 9** - Statistické charakteristiky výpočtu zabezpečení podle dodávky vody  $P_d$  v UNCE RESERVOIR

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(P_d)$	$\sigma(P_d)$	$c_v$	$\mu(P_d)$	$\sigma(P_d)$	$c_v$
	%	%	-	%	%	-
1	100	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
2	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
3	99.983	0.006	0.0001	100.000	0.000	0.0000
4	99.982	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
5	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
6	99.982	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
7	99.983	0.006	0.0001	100	0	0
8	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
9	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
10	99.983	0.008	0.0001	100	0	0
11	99.982	0.006	0.0001	100	0	0
12	99.982	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
13	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
14	99.982	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
15	99.982	0.019	0.0002	99.999	0.005	0.0001
16	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
17	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
18	99.982	0.005	0.0001	100	0	0
19	99.982	0.020	0.0002	99.999	0.005	0.0001

i	se ztrátami			bez ztrát		
	$\mu(P_d)$	$\sigma(P_d)$	$c_v$	$\mu(P_d)$	$\sigma(P_d)$	$c_v$
	%	%	-	%	%	-
20	99.978	0.031	0.0003	99.994	0.015	0.0002
21	99.981	0.007	0.0001	100	0	0
22	99.981	0.005	0.0001	100	0	0
23	99.981	0.006	0.0001	100	0	0
24	99.981	0.007	0.0001	100	0	0
25	99.978	0.032	0.0003	99.994	0.015	0.0002
26	99.981	0.002	0.0000	100	0	0
27	99.981	0.000	0	100	0	0
28	99.981	0.004	0.0000	100	0	0
29	99.981	0.002	0.0000	100	0	0
30	99.981	0.008	0.0001	100	0	0
31	99.981	0.002	0.0000	100	0	0
32	99.981	0.005	0.0001	100	0	0

### 5.3.2.1 Závislost $O_p$ na $P_t$

Do výsledků této práce jsem zahrnul výstupy z Úlohy typu P ( $O_p$ ;  $V_z$ ). Počáteční nastavení v programu UNCE RESERVOIR bylo nastavené stejně, jako v Úlohy typu  $V_z$  ( $O_p$ ; P) pro  $P=100$  %. Opět u maximálních a minimálních bylo provedeno porovnání změn zabezpečení podle dodávky vody a podle trvání.

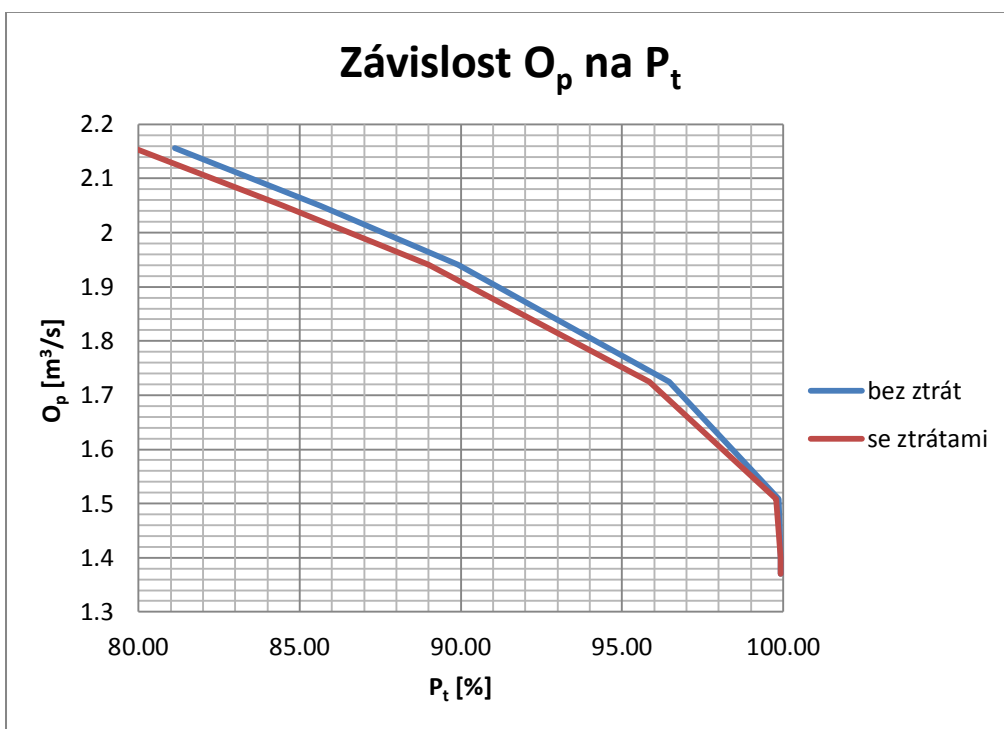
#### 5.3.2.1.1 Maximální hodnoty

Maximálního zásobního objemu nastalo při variantě č. 20, interval součinitele nalepšení  $\alpha$  je  $\langle 0,64; 1,0 \rangle$ . Aby mohla tato nádrž být zařazena dle třídy významnosti do skupiny A, bylo by nutné, aby součinitel nalepšení byl 0,7 a nižší. Pro reálné využití ale není příliš vhodné navrhnout součinitel nalepšení menší než 0,6.

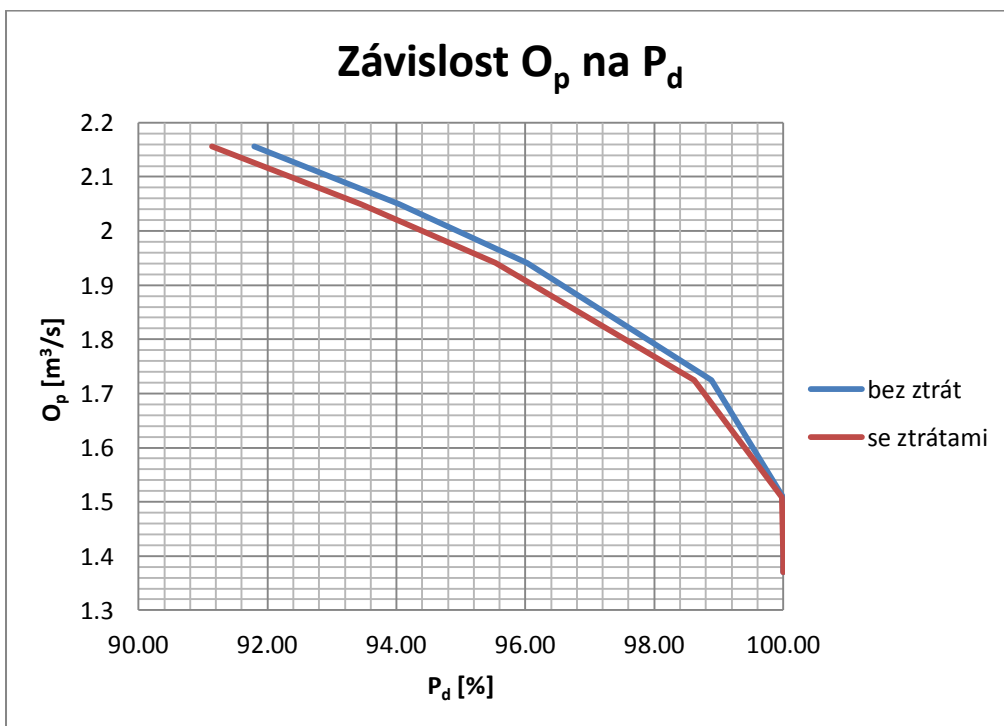
**Tabulka 10** - Závislost  $P_t$  a  $P_d$  na  $O_p$  - při max  $V_z$

Úloha typu P ( $O_p$ ; $V_z$ )					
$\alpha$	$O_p$	se ztrátami		bez ztrát	
		$P_t$	$P_d$	$P_t$	$P_d$
-	$m^3/s$	%	%	%	%
1	2.156	79.85	91.14	81.12	91.80
0.95	2.05	84.49	93.44	85.63	94.04
0.9	1.941	88.99	95.54	89.91	96.03
0.8	1.725	95.85	98.62	96.46	98.89
0.7	1.509	99.77	99.98	99.86	99.99
0.65	1.4	99.91	100	99.91	100
0.64	1.37	99.91	100	99.91	100





Graf 3 - Závislost  $O_p$  na  $P_t$  při max  $V_z$



Graf 4 - Závislost  $O_p$  na  $P_d$  při max  $V_z$

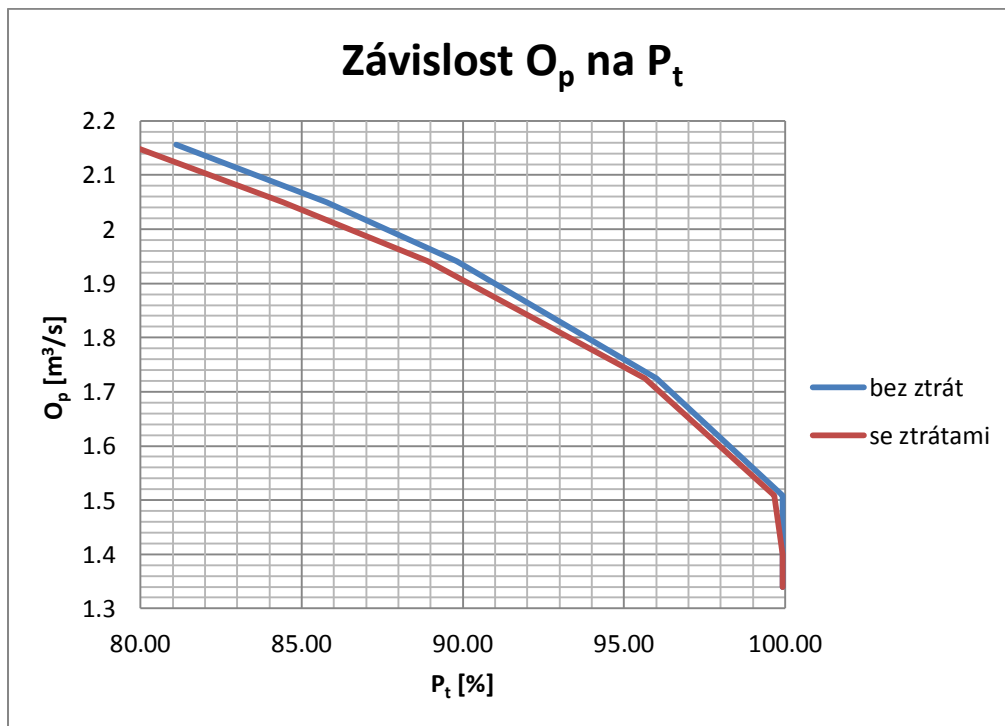
#### 5.3.2.1.2 Minimální hodnoty

Rozdíl v porovnání s výsledky *Maximální hodnoty* není výrazný. I zde je patrné, že pro optimální návrh by bylo vhodné uvažovat součinitel nalepšení  $\alpha$  v intervalu od 0,6 do 0,7.

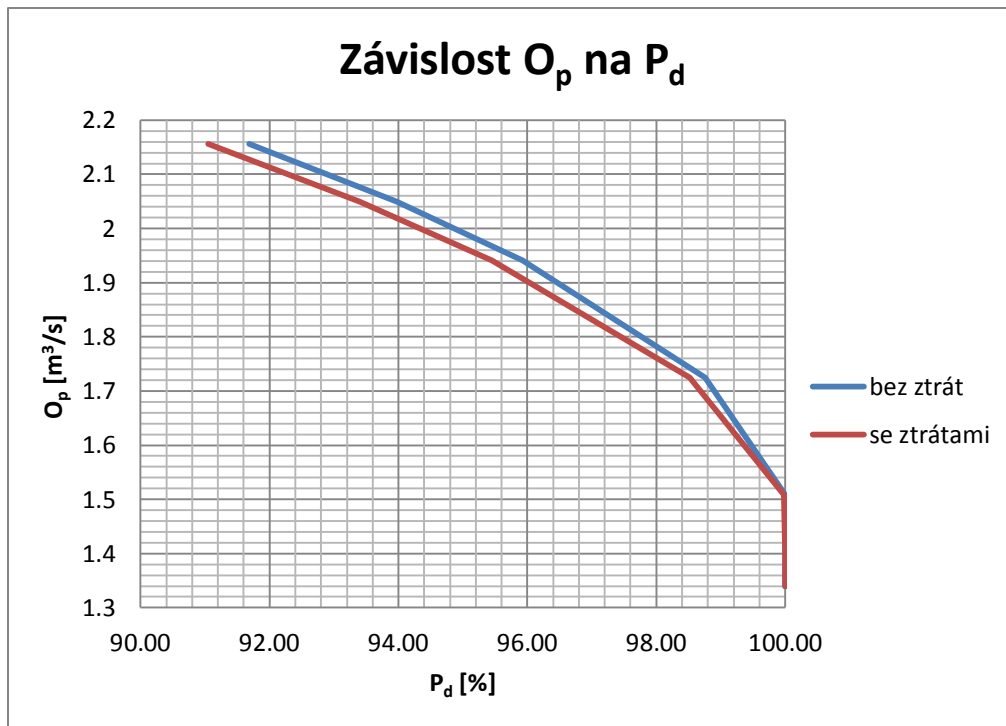
Hodnoty zabezpečení jak podle trvání, tak i dodávky vody, splňují pro  $\alpha = 0,7$  veškerá kritéria pro zařazení nádrže podle významnosti do všech kategorií.

**Tabulka 11** - Závislost  $P_t$  a  $P_d$  na  $O_p$  - při min  $V_z$

Úloha typu P ( $O_p$ ; $V_z$ )					
$\alpha$	$O_p$	se ztrátami		bez ztrát	
		$P_t$	$P_d$	$P_t$	$P_d$
-	$\text{m}^3/\text{s}$	%	%	%	%
1	2.156	79.61	91.05	81.11	91.69
0.95	2.05	84.43	93.39	85.78	93.97
0.9	1.941	88.91	95.45	89.82	95.92
0.8	1.725	95.65	98.52	96.00	98.76
0.7	1.509	99.67	99.98	99.91	100.00
0.65	1.4	99.91	100	99.91	100
0.62	1.34	99.91	100	99.91	100



**Graf 5** - Závislost  $O_p$  na  $P_t$  při min  $V_z$



Graf 6 - Závislost  $O_p$  na  $P_d$  při min  $V_z$

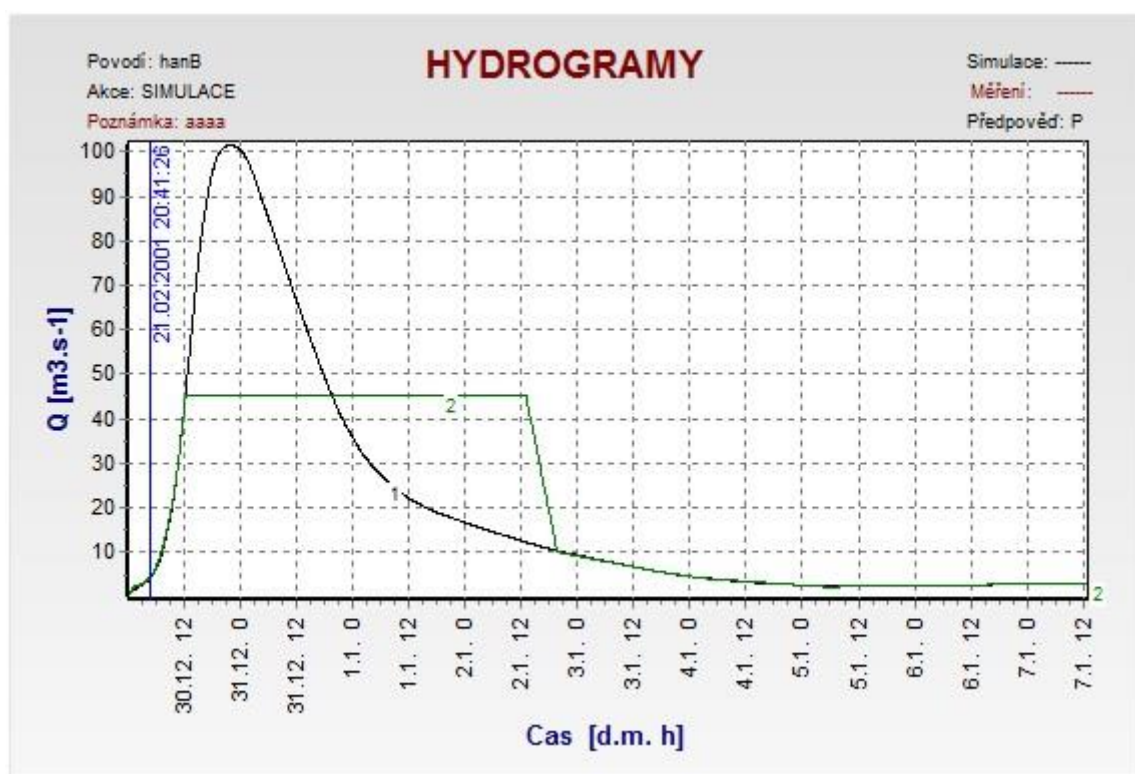
## 5.4 VÝPOČET RETENČNÍHO OBJEMU NÁDRŽE

Pro stanovení retenčního prostoru jsem využil modelu HYDROG [17], ve kterém byl simulován i proces transformace povodňové vlny nádrží. Transformaci povodně ovlivňuje i samotné nastavení bezpečnostního přelivu a jeho rozměry, nastavení odtoku z nádrže a velikosti retenčních prostorů (ovladatelného a neovladatelného). Všechny uvedené faktory mohou při optimálním návrhu výrazně snížit účinek povodňové vlny a možné škody způsobené nedostatečným návrhem hráze a např. přelitím vody přes hráz koruny.

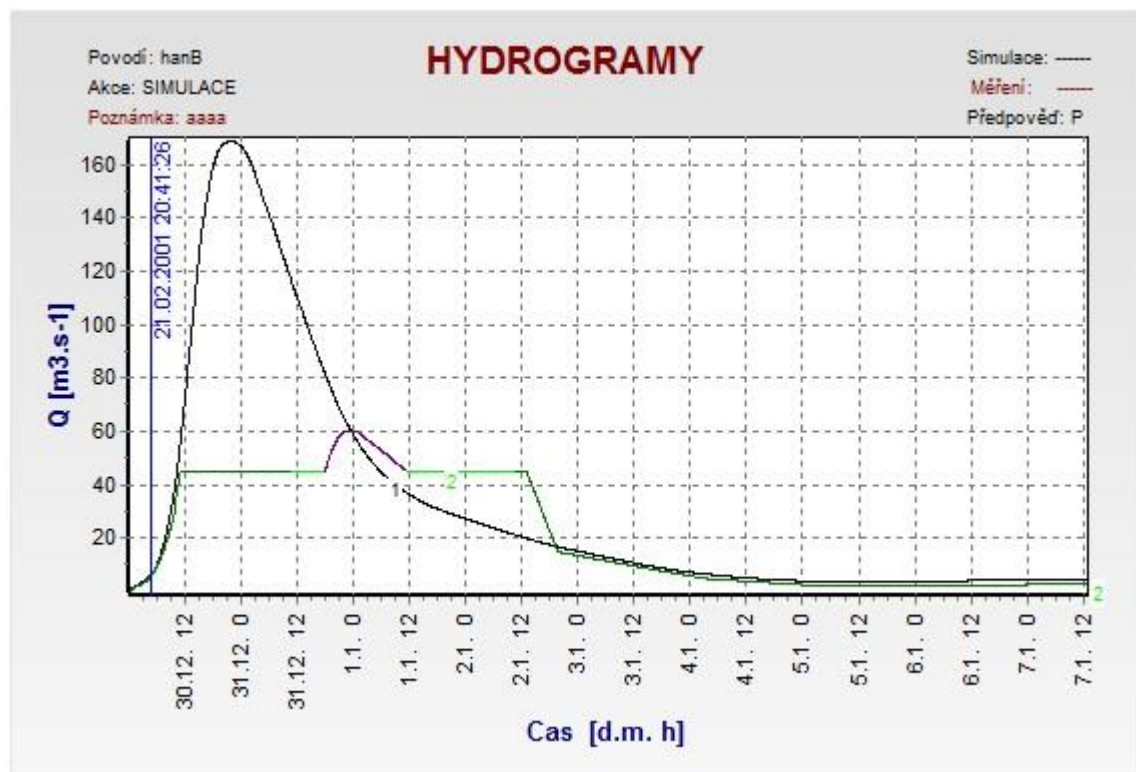
### 5.4.1 DETERMINISTICKÉ ŘEŠENÍ

Stejně jako u výpočtu zásobního objemu i pro retenční objem vstupovaly jako hlavní podklady batygrafické čáry a průtoková řada. Velikost retenčního objemu je proměnlivá v závislosti na velikosti povodňové vlny, proto jako podklady byly použity průtokové řady  $Q_{100}$ ,  $Q_{1000}$  a  $Q_{10000}$ . Pro  $Q_{10000}$  byla použita řada z posudku k VD Hanušovice, kde byla hodnota odvozena na  $245,3 \text{ m}^3/\text{s}$ . [4] Hodnota maximálního průtoku pro  $Q_{1000}$  byla z historie stanovena a naměřena na  $168,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hodnota  $Q_{100}$  byla stanovena z návrhového hydrogramu ČHMÚ, tj.  $101 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při těchto kulminačních průtocích bez zatížení nejistot jsem stanovil objemy celé nádrže - jedná se o deterministické řešení. V programu HYDROG bylo zapotřebí též nastavit hodnotu neškodného odtoku, který v tomto případě korespondoval s  $Q_{10}$ , tj. rovno

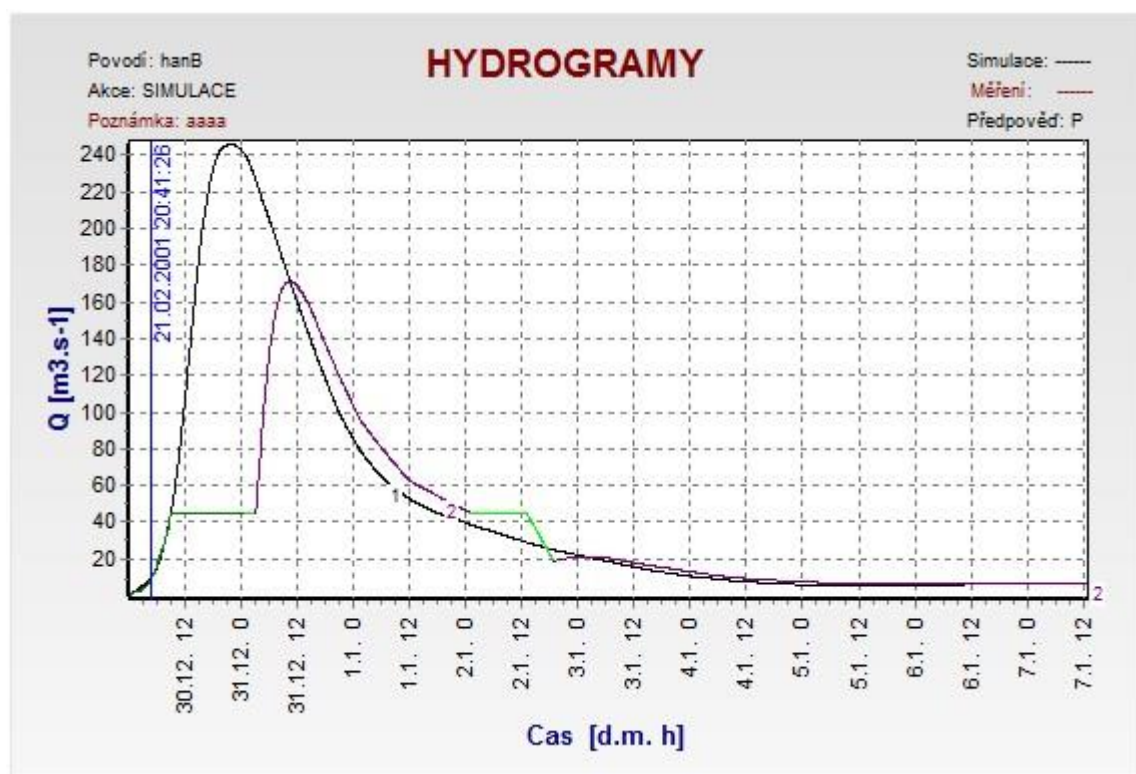
45,2 m<sup>3</sup>/s. Odtok z nádrže byl pak upraven tak, aby korespondoval s čarou přítoku až do hodnoty neškodného odtoku. Stejným způsobem jsem postupoval i po následné kulminaci přítoku a snahou bylo vyrovnání objemu retenčního objemu neovladatelného a vyrovnání přítoku a odtoku (viz *Obrázek 11, 12, 13*). Chování nádrže při jednotlivých povodňových průtocích bylo nastaveno pro všechny konstantně, spodní výpusti byly pak otevřeny na sto procent.



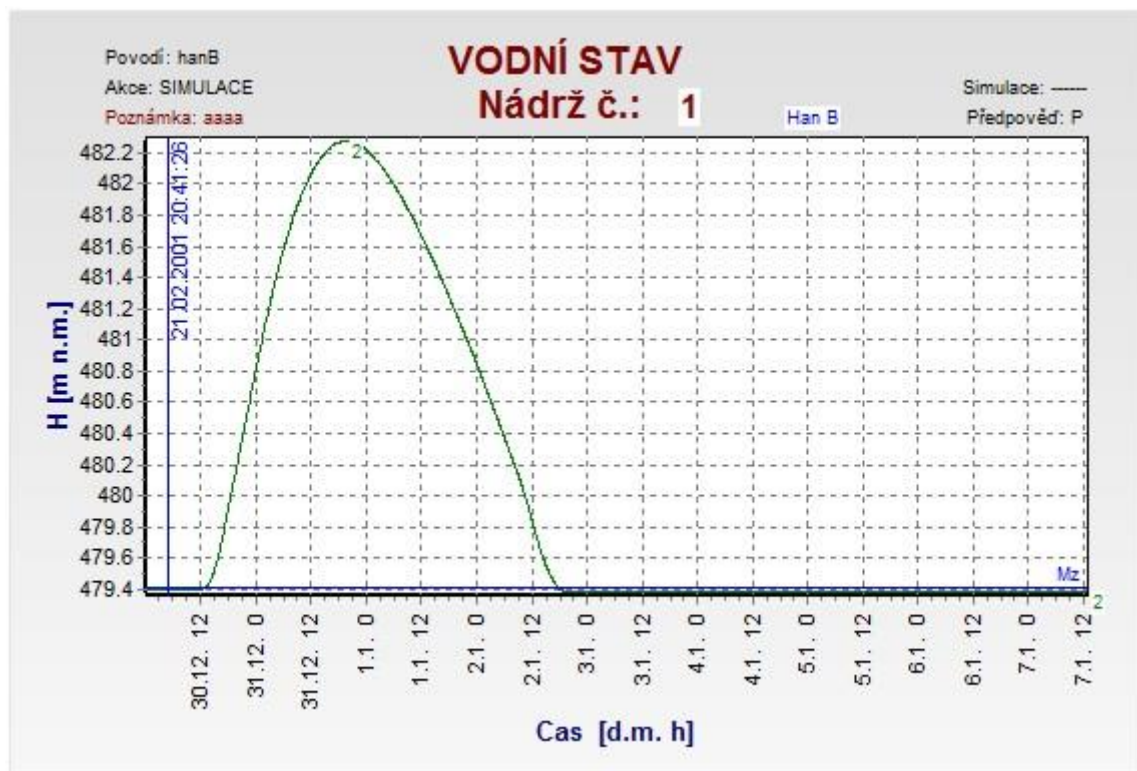
*Obrázek 11 - Hydrogram povodně při Q<sub>100</sub>*



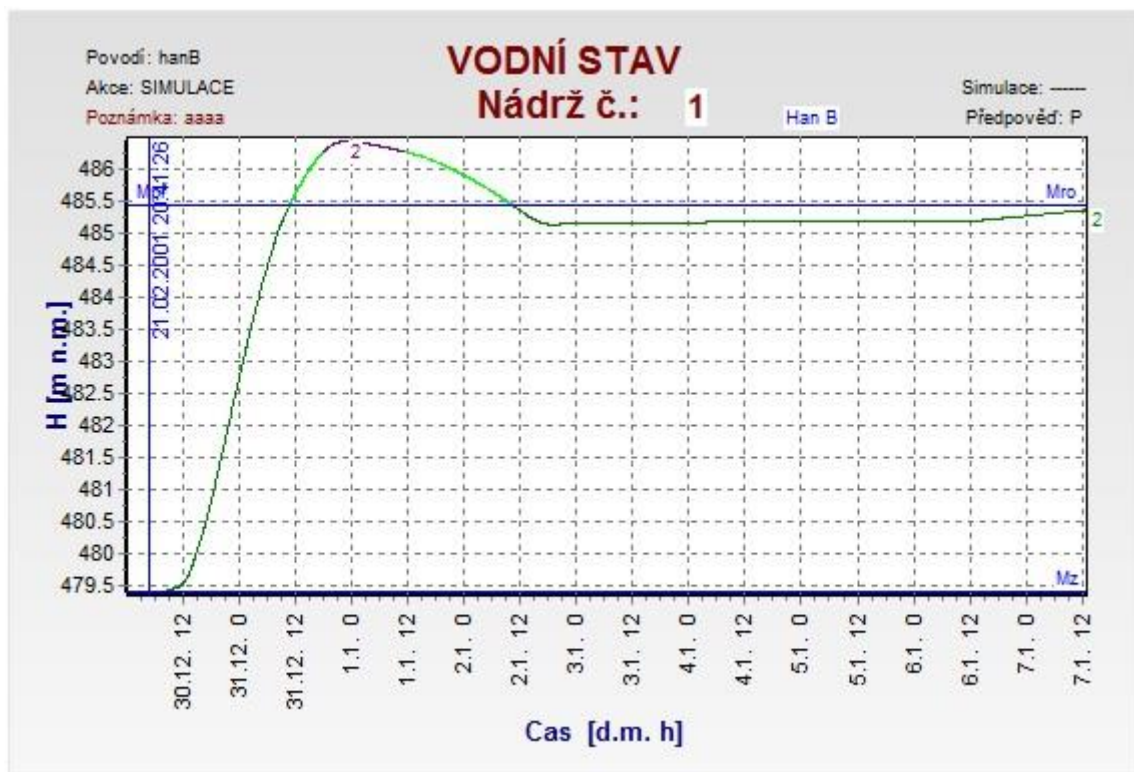
Obrázek 12 - Hydrogram povodně při  $Q_{1000}$



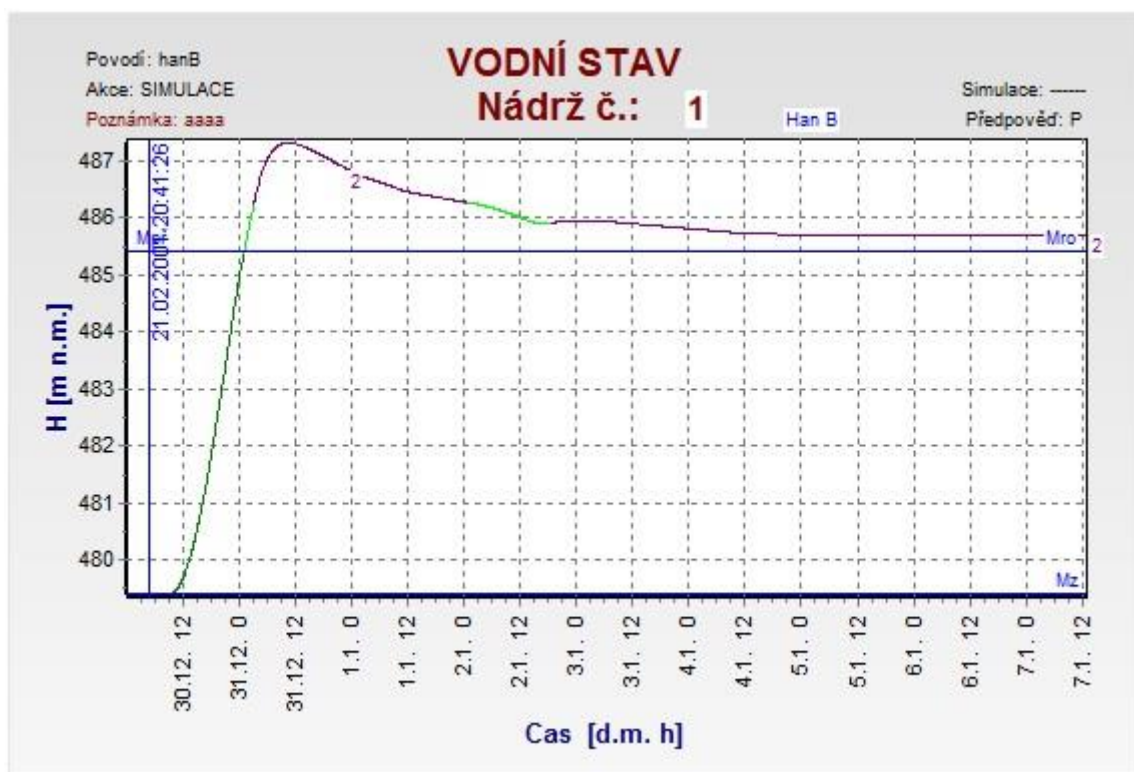
Obrázek 13 - Hydrogram povodně při  $Q_{10000}$



Obrázek 14 - Vodní hladina povodně při  $Q_{100}$



Obrázek 15 - Vodní hladina povodně při  $Q_{1000}$



Obrázek 16 - Vodní hladina povodně při  $Q_{1000}$

Výsledky deterministického řešení jsou rozděleny na dvě základní veličiny - velikost objemu celé nádrže a výška hladiny vody v nádrži.

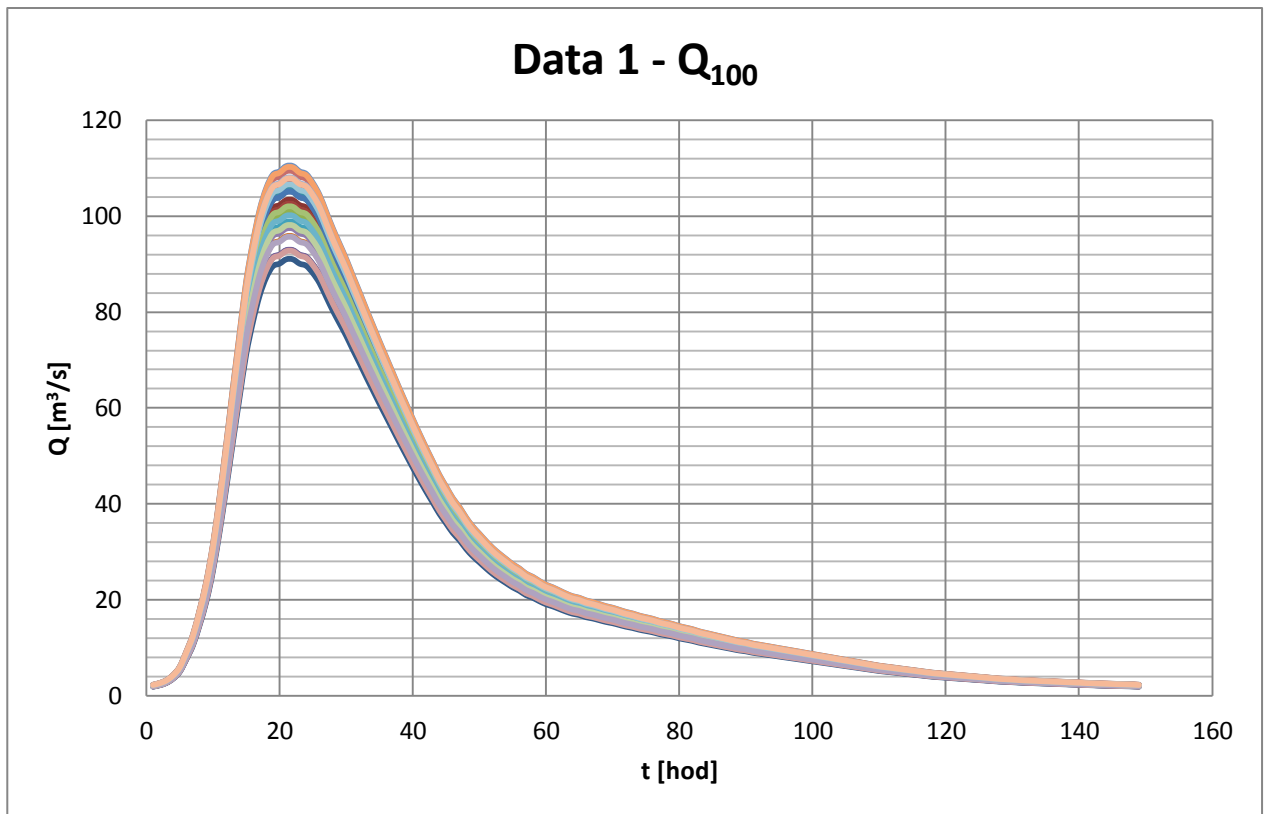
**Tabulka 12 - Deterministické řešení objemů nádrže a výšky hladiny**

	$H$	$V_m$	$V_{sn}$	$V_z$	$V_r$	$V$
	m n. m.	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
$Q_{100}$	482,274	485	2 796 360	21 000 000	3 784 055	27 580 900
$Q_{1000}$	486,423	485	2 796 360	21 000 000	9 895 555	33 692 400
$Q_{10000}$	487,303	485	2 796 360	21 000 000	11 364 455	35 161 300

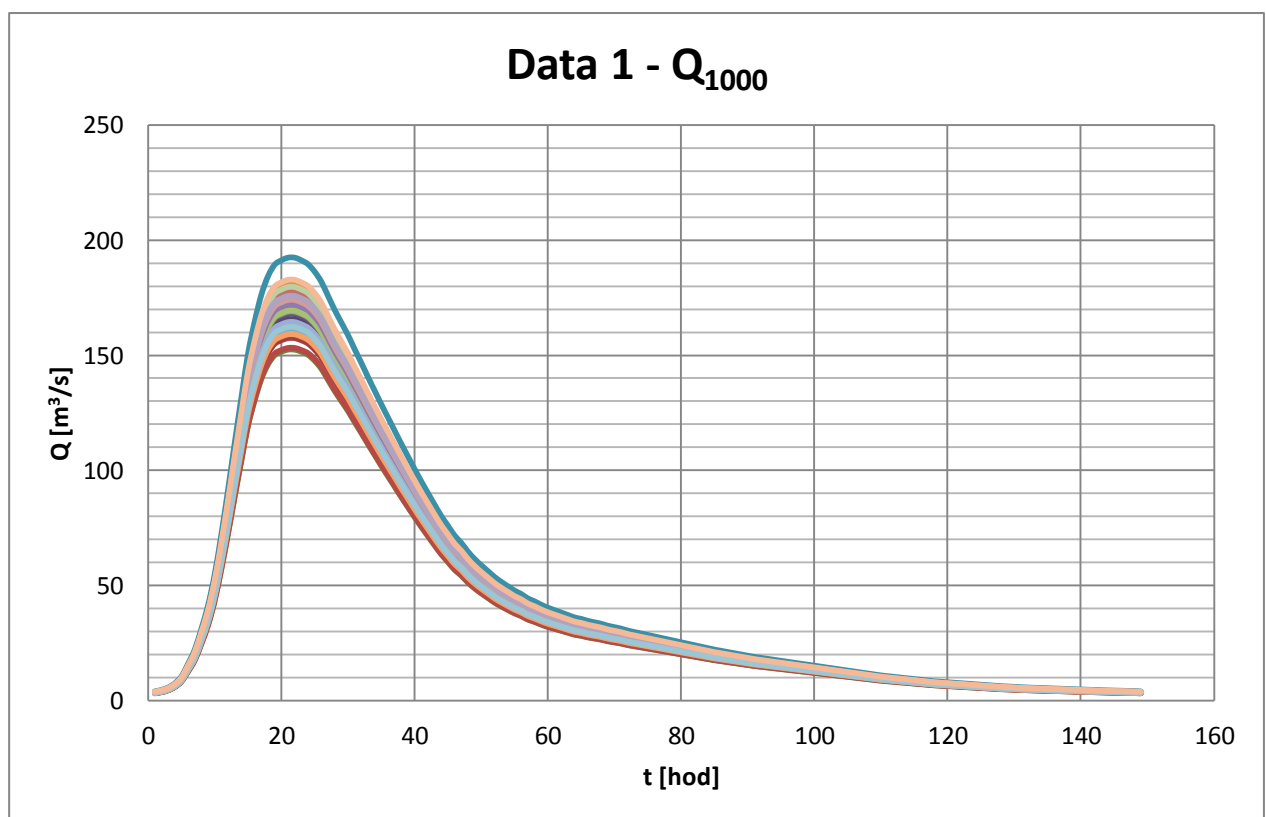
### 5.4.3. STOCHASTICKÉ ŘEŠENÍ

Původní průtoková řada byla dle daného postupu rozkmitána a nahodile zatížena (stochastické řešení). Takto byly vygenerovány dva typy průtokových řad. *Data 1* byla náhodně generována a zároveň kopírovala deterministický průběh průtokové řady (viz *Graf 7, 8, 9*). *Data 2* byla generována pomocí náhodného generátoru a následného rozkmitání průtokové řady, takto bylo vygenerováno třicet průtokových řad (viz *Graf 10, 11, 12*). V programu HYDROG bylo též zapotřebí nastavit hodnotu neškodného odtoku, který v tomto případě korespondoval s  $Q_{10}$ , tj. rovno 45,2 m<sup>3</sup>/s. Řady byly vygenerovány v rozpětí  $\pm 15\%$ . Odtok z nádrže byl pak upraven tak, aby korespondoval s čarou přítoku až do hodnoty neškodného odtoku. Stejným způsobem jsem postupoval i po následné kulminaci přítoku a snahou bylo vyrovnaní objemu retenčního objemu neovladatelného a vyrovnaní přítoku a odtoku. Chování nádrže při jednotlivých povodňových průtocích bylo nastaveno pro všechny konstantně, spodní výpusti byly pak otevřeny na sto procent.

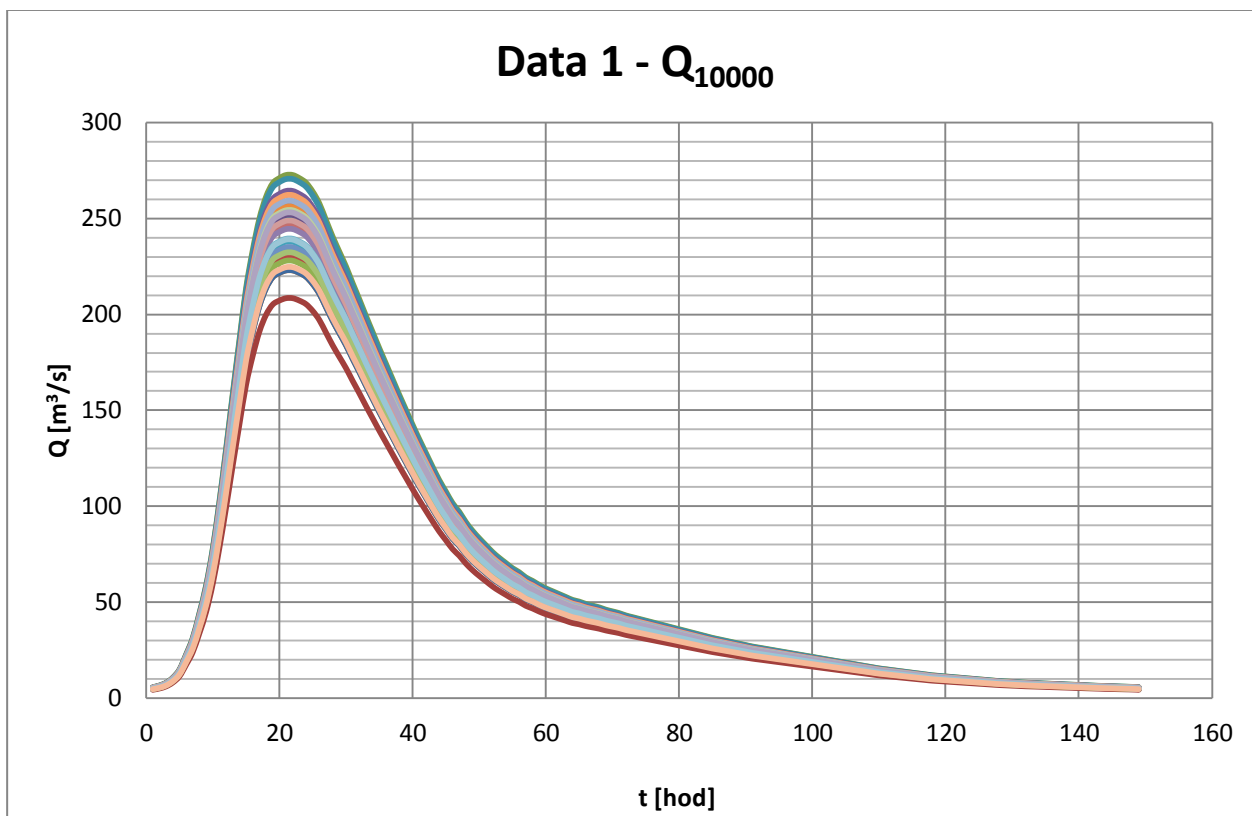




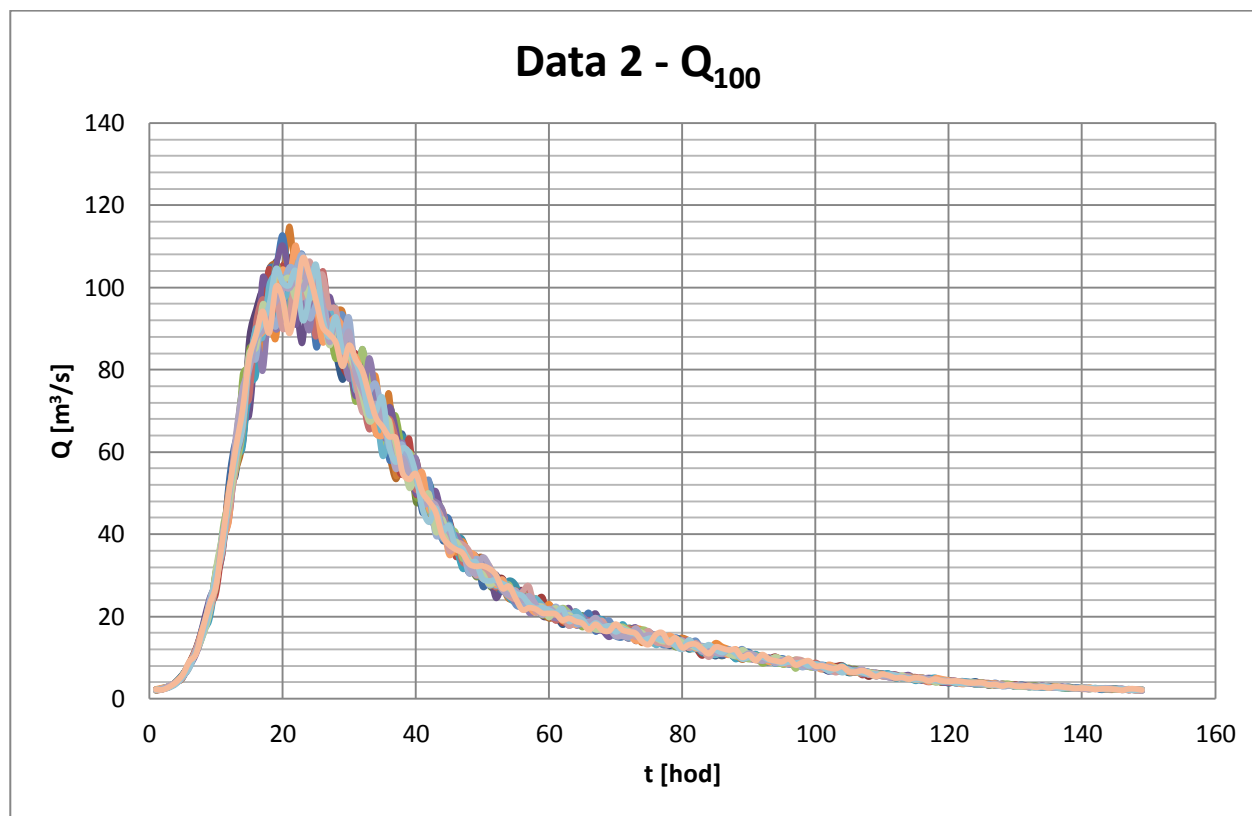
*Graf 7 - Průběh průtokové řady  $Q_{100}$  - Data 1*



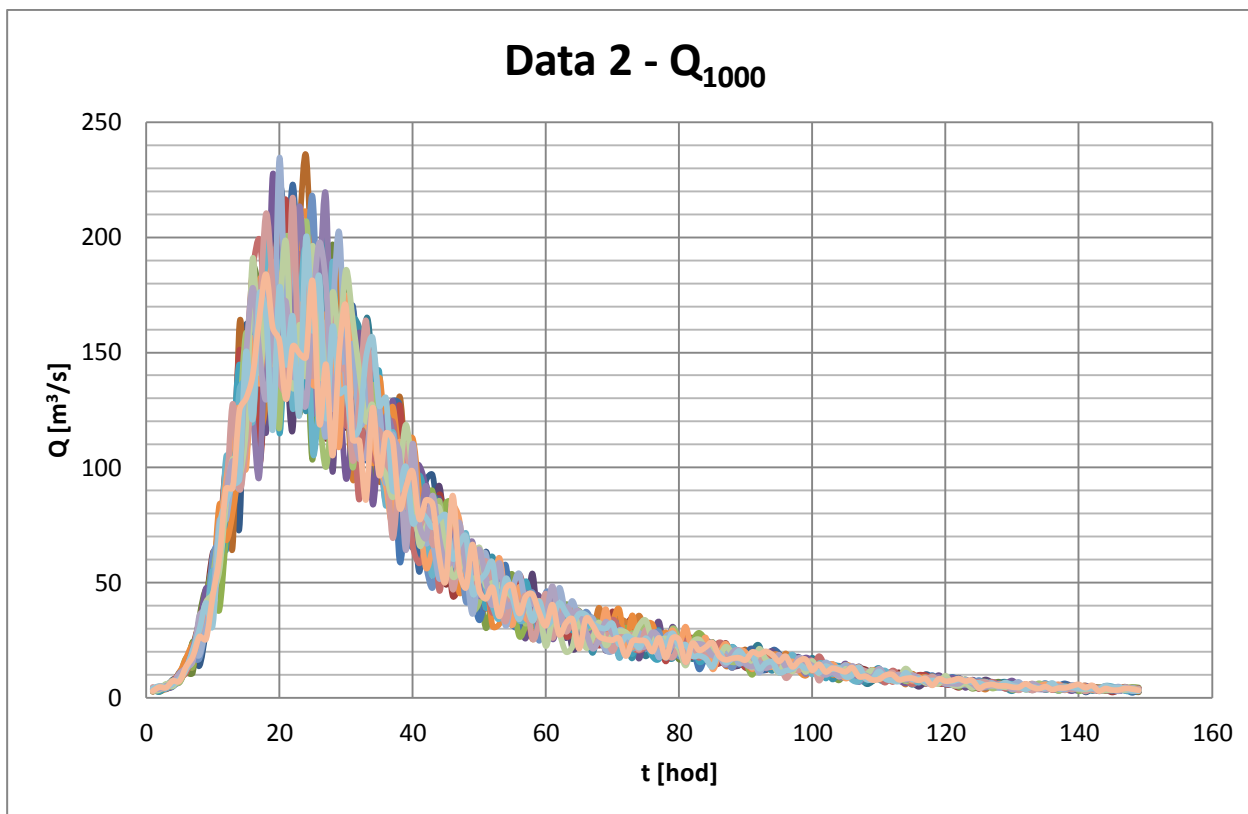
*Graf 8 - Průběh průtokové řady  $Q_{1000}$  - Data 1*



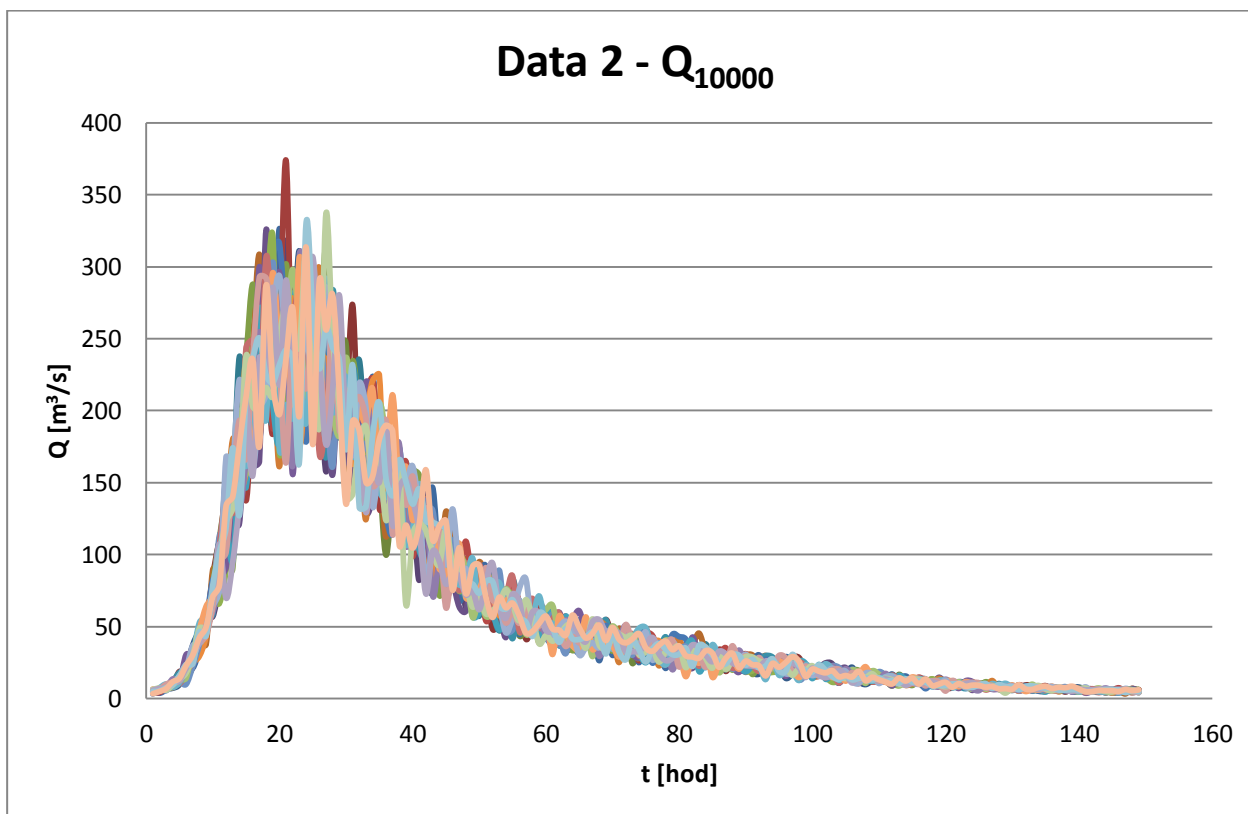
*Graf 9 - Průběh průtokové řady  $Q_{10000}$  - Data 1*



*Graf 10 - Průběh průtokové řady  $Q_{100}$  - Data 2*



*Graf 11 - Průběh průtokové řady  $Q_{1000}$  - Data 2*



*Graf 12 - Průběh průtokové řady  $Q_{10000}$  - Data 2*

Simulací v programu HYDROG byly získány hodnoty celkového objemu nádrže při daném průtoku a výšce vodní hladiny. Vyhodnoceno bylo celkem třicet variant průtokových řad. Všechny výpočty byly uvažovány při nalepšeném odtoku  $O_p=1,509 \text{ m}^3/\text{s}$  a součiniteli nalepšení  $\alpha = 0,7$ .

#### 5.4.3.1. *Hodnoty objemů nádrže při $Q_{100}$*

Výstupem jsou maximální hodnoty celkového objemu nádrže pro jednotlivé varianty zatížení nejistotami průtokové řady pro oba druhy vstupních dat.

**Tabulka 13** – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při  $Q_{100}$  v HYDROG

	Data 1	Data 2
i	$V_c$	$V_c$
-	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$
1	26 656 299	27 516 128
2	27 772 568	27 735 542
3	27 688 916	27 512 014
4	27 347 453	27 638 177
5	26 801 661	27 594 294
6	27 542 183	27 494 186
7	27 956 327	27 610 750
8	27 691 659	27 536 698
9	28 107 174	27 631 320
10	27 939 871	27 620 349
11	27 996 096	27 580 581
12	27 081 414	27 649 147
13	27 938 500	27 627 206
14	28 162 027	27 581 952
15	27 591 551	27 566 867
16	26 804 404	27 579 209
17	27 377 623	27 468 131
18	27 287 114	27 597 037
19	28 437 666	27 613 493
20	28 326 588	27 609 379
21	27 653 261	27 592 923
22	27 263 802	27 462 646
23	27 490 072	27 650 519
24	28 410 239	27 583 323
25	28 214 138	27 636 805
26	26 789 319	27 538 069
27	27 321 398	27 480 473
28	27 063 587	27 606 636
29	28 072 891	27 580 581
30	28 196 311	27 512 014

	Data 1	Data 2
i	$V_c$	$V_c$
-	$m^3$	$m^3$
$\mu(V_c)$	27 632 737	27 580 215

Průměrná hodnota objemu nádrže u podkladu *Data 1* činí 27 632 737 m<sup>3</sup>, v porovnání s deterministickým řešením je tato hodnota o 51 837 m<sup>3</sup> vyšší, v procentech se jedná pak o 0,19 %. U podkladu *Data 2* je průměrná hodnota 27 580 215 m<sup>3</sup>, tj. o 685 m<sup>3</sup> nižší než u deterministického řešení. V přepočtu na procenta je to potom o 0,003 % nižší, což lze považovat za zanedbatelně malou hodnotu.

Od celkového objemu nádrže (viz *Tabulka 13, 15, 17*) jsem odečetl objem mrtvého prostoru (485,25 m<sup>3</sup>), objem prostoru stálého nadržení (2 736 960 m<sup>3</sup>) a zásobní objem (21 000 000 m<sup>3</sup>). Z rozdílu jsem pak dostal hodnoty retenčního objemu (viz *Tabulka 14, 16, 18*), ovladatelného i neovladatelného.

**Tabulka 14** – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při  $Q_{100}$  v HYDROG

i	Data 1	Data 2
	$V_r$	$V_r$
	$m^3$	$m^3$
1	2 859 454	3 719 282
2	3 975 723	3 938 696
3	3 892 071	3 715 168
4	3 550 608	3 841 331
5	3 004 816	3 797 449
6	3 745 338	3 697 341
7	4 159 482	3 813 905
8	3 894 814	3 739 853
9	4 310 329	3 834 475
10	4 143 026	3 823 504
11	4 199 250	3 783 735
12	3 284 569	3 852 302
13	4 141 654	3 830 361
14	4 365 182	3 785 107
15	3 794 706	3 770 022
16	3 007 559	3 782 364
17	3 580 777	3 671 286
18	3 490 269	3 800 191
19	4 640 821	3 816 647
20	4 529 743	3 812 533
21	3 856 416	3 796 077
22	3 466 956	3 665 800
23	3 693 227	3 853 674
24	4 613 394	3 786 478
25	4 417 293	3 839 960
26	2 992 474	3 741 224
27	3 524 553	3 683 628
28	3 266 741	3 809 791
29	4 276 045	3 783 735
30	4 399 466	3 715 168
$\mu(V_r)$	3 835 892	3 783 370

Maximální hodnota objemu retenčního prostoru při  $Q_{100}$  je 4 640 821  $m^3$ , naopak minimální hodnota je 2 859 454  $m^3$ . To vše je z průtokové řady *Data 1*. Retenční objem u řady *Data 2* se pohybuje v rozmezí od 3 665 800  $m^3$  do 3 938 696  $m^3$ . Průměrné hodnoty retenčního objemu bez přičtení/odečtení směrodatné odchylky se liší přesně o 52 522  $m^3$ . Tato hodnota je dána rozdílným způsobem stanovení průtokové řady.

### 5.4.3.2. Hodnoty objemů nádrže při $Q_{1000}$

Výstupem jsou maximální hodnoty celkového objemu nádrže pro jednotlivé varianty zatížení nejistotami průtokové řady pro oba druhy vstupních dat.

**Tabulka 15** – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při  $Q_{1000}$  v HYDROG

	Data 1	Data 2
i	$V_c$	$V_c$
-	$m^3$	$m^3$
1	33 684 718	33 990 046
2	33 477 829	33 626 322
3	32 436 712	33 803 178
4	33 592 953	33 824 868
5	33 796 505	33 632 996
6	33 801 510	33 950 003
7	33 531 220	33 778 152
8	32 958 939	33 546 236
9	33 386 064	33 686 386
10	33 694 729	33 751 456
11	34 315 395	33 929 981
12	33 843 221	33 654 686
13	34 031 757	33 689 723
14	32 515 129	33 783 157
15	33 719 756	33 878 259
16	33 928 313	33 691 392
17	33 461 145	33 748 119
18	34 060 121	33 853 232
19	33 859 906	33 818 195
20	33 983 372	33 843 221
21	33 733 103	33 651 349
22	33 819 863	33 743 114
23	33 389 401	33 622 985
24	33 119 111	33 691 392
25	33 554 578	33 854 901
26	33 879 928	33 748 119
27	34 025 083	33 871 585
28	33 924 976	33 709 745
29	33 441 123	33 768 141
30	34 101 832	33 532 888
$\mu(V_c)$	33 635 610	33 755 794

Průměrná velikost objemu nádrže při  $Q_{1000}$  a podkladu *Data 1* činí 33 635 610  $m^3$ , u podkladu *Data 2* hodnota vyšla 33 755 794  $m^3$ . První hodnota je o 56 790  $m^3$  nižší

než původní deterministické řešení, v přepočtu na procenta se jedná o rozdíl 0,17 %. Druhá hodnota je naopak vyšší a to o 63 394 m<sup>3</sup>, tj. v procentuálním vyjádření 0,19 %.

**Tabulka 16** – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při  $Q_{1000}$  v HYDROG

	Data 1	Data 2
i	$V_r$	$V_r$
-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
1	9 887 873	10 193 200
2	9 680 984	9 829 477
3	8 639 867	10 006 333
4	9 796 108	10 028 023
5	9 999 659	9 836 151
6	10 004 665	10 153 157
7	9 734 375	9 981 306
8	9 162 094	9 749 391
9	9 589 219	9 889 541
10	9 897 883	9 954 611
11	10 518 550	10 133 136
12	10 046 376	9 857 841
13	10 234 912	9 892 878
14	8 718 284	9 986 312
15	9 922 910	10 081 414
16	10 131 468	9 894 547
17	9 664 299	9 951 274
18	10 263 276	10 056 387
19	10 063 061	10 021 349
20	10 186 527	10 046 376
21	9 936 258	9 854 504
22	10 023 018	9 946 269
23	9 592 556	9 826 140
24	9 322 266	9 894 547
25	9 757 733	10 058 055
26	10 083 082	9 951 274
27	10 228 238	10 074 740
28	10 128 131	9 912 900
29	9 644 278	9 971 296
30	10 304 987	9 736 043
$\mu(V_r)$	9 838 764	9 958 949

Maximální hodnota objemu retenčního prostoru při  $Q_{1000}$  je 10 518 550 m<sup>3</sup>, naopak minimální hodnota je 8 639 867 m<sup>3</sup>. To vše je z průtokové řady *Data 1*. Retenční objem u řady *Data 2* se pohybuje v rozmezí od 9 736 043 m<sup>3</sup> do 10 193 200 m<sup>3</sup>. Průměrné hodnoty



retenčního objemu bez přičtení/odečtení směrodatné odchylky se liší přesně o 120 185 m<sup>3</sup>. Tato hodnota je dána rozdílným způsobem stanovení průtokové řady.

#### 5.4.3.3. *Hodnoty objemu nádrže při Q<sub>10000</sub>*

Výstupem jsou maximální hodnoty celkového objemu nádrže pro jednotlivé varianty zatížení nejistotami průtokové řady pro oba druhy vstupních dat.

**Tabulka 17** – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při Q<sub>10000</sub> v HYDROG

	Data 1	Data 2
i	V <sub>c</sub>	V <sub>c</sub>
-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
1	35 193 004	35 268 084
2	35 194 672	35 364 855
3	35 157 966	35 353 175
4	35 396 555	35 169 645
5	35 226 373	35 441 604
6	34 822 606	35 276 426
7	34 824 274	35 373 197
8	34 580 680	35 162 971
9	35 538 374	35 359 849
10	35 254 736	34 916 040
11	35 511 679	35 199 677
12	35 326 480	35 169 645
13	35 007 805	35 254 736
14	34 936 061	35 318 138
15	34 904 360	35 152 961
16	35 424 919	35 374 865
17	35 054 522	35 059 527
18	35 309 796	35 411 572
19	35 009 473	35 199 677
20	35 169 645	35 339 828
21	34 967 762	35 258 073
22	35 149 624	35 386 545
23	35 074 543	35 151 292
24	35 394 887	35 403 229
25	35 351 507	35 383 208
26	35 211 357	35 339 828
27	35 288 106	35 132 939
28	35 269 753	35 072 875
29	35 069 538	35 104 575
30	34 852 638	35 209 688
μ(V <sub>c</sub> )	35 149 123	35 253 624

Průměrná hodnota objemu vodní nádrže při  $Q_{10000}$  a podkladu *Data 1* vyšla  $35\,149\,123\text{ m}^3$ , u podkladu *Data 2* pak  $35\,253\,624\text{ m}^3$ . Při porovnání s deterministickým řešením je první hodnota o  $12\,177\text{ m}^3$  nižší, při přepočtu na procenta se pak jedná o 0,03 %. Druhá hodnota je naopak vyšší a to o  $92\,324\text{ m}^3$ , tj. v procentech 0,26 %.

**Tabulka 18** – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při  $Q_{10000}$  v HYDROG

	Data 1	Data 2
i	$V_r$	$V_r$
-	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$
1	11 396 158	11 471 239
2	11 397 827	11 568 009
3	11 361 121	11 556 330
4	11 599 710	11 372 800
5	11 429 527	11 644 758
6	11 025 761	11 479 581
7	11 027 429	11 576 352
8	10 783 834	11 366 126
9	11 741 529	11 563 004
10	11 457 891	11 119 194
11	11 714 834	11 402 832
12	11 529 635	11 372 800
13	11 210 960	11 457 891
14	11 139 216	11 521 293
15	11 107 515	11 356 115
16	11 628 074	11 578 020
17	11 257 676	11 262 682
18	11 512 950	11 614 726
19	11 212 628	11 402 832
20	11 372 800	11 542 983
21	11 170 917	11 461 228
22	11 352 778	11 589 699
23	11 277 698	11 354 447
24	11 598 042	11 606 384
25	11 554 662	11 586 362
26	11 414 511	11 542 983
27	11 491 260	11 336 094
28	11 472 907	11 276 029
29	11 272 692	11 307 730
30	11 055 793	11 412 843
$\mu(V_r)$	11 352 278	11 456 779

Maximální hodnota objemu retenčního prostoru při  $Q_{10000}$  je  $11\,741\,529\text{ m}^3$ , naopak minimální hodnota je  $10\,783\,834\text{ m}^3$ . To vše je z průtokové řady *Data 1*. Retenční objem

u řady *Data 2* se pohybuje v rozmezí od 11 119 194 m<sup>3</sup> do 11 644 758 m<sup>3</sup>. Průměrné hodnoty retenčního objemu bez přičtení/odečtení směrodatné odchylky se liší přesně o 104 501 m<sup>3</sup>. Tato hodnota je dána rozdílným způsobem stanovení průtokové řady.

Z výše uvedených *Tabulek 13, 14, 15, 16, 17, 18* byly vyhodnoceny statistické charakteristiky popisujících vlastnosti základního souboru.

**Tabulka 19** - Statistické charakteristiky celkového objemu nádrže - HYDROG

		$\mu(V_c)$	$D(V_c)$	$\sigma(V_c)$	$C_s$	$C_v$
		m <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup>	-	-
Data 1	$Q_{100}$	27 632 737	2.579E+11	507 883	- 0.2698	0.0184
	$Q_{1000}$	33 635 610	1.791E+11	423 258	- 1.3291	0.0126
	$Q_{10000}$	35 149 123	4.866E+10	220 600	- 0.4393	0.0063
Data 2	$Q_{100}$	27 580 215	3.735E+09	61 115	- 0.0771	0.0022
	$Q_{1000}$	33 755 794	1.249E+10	111 761	0.0518	0.0033
	$Q_{10000}$	35 253 624	1.571E+10	125 330	- 0.6083	0.0036

**Tabulka 20** - Statistické charakteristiky objemu retenčního prostoru - HYDROG

		$\mu(V_r)$	$D(V_r)$	$\sigma(V_r)$	$C_s$	$C_v$
		m <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup>	-	-
Data 1	$Q_{100}$	3 835 892	2.579E+11	507 883	- 0.2698	0.1324
	$Q_{1000}$	9 838 764	1.791E+11	423 258	- 1.3291	0.0430
	$Q_{10000}$	11 352 278	4.866E+10	220 600	- 0.4393	0.0194
Data 2	$Q_{100}$	3 783 370	3.735E+09	61 115	- 0.0771	0.0162
	$Q_{1000}$	9 958 949	1.249E+10	111 761	0.0518	0.0112
	$Q_{10000}$	11 456 779	1.571E+10	125 330	- 0.6083	0.0109

V *Tabulkách 19, 20* jsou uvedeny statistické charakteristiky celkových objemů a objemů retenčního prostoru nádrže pro povodňové průtoky  $Q_{100}$ ,  $Q_{1000}$  a  $Q_{10000}$ . Vzhledem k uvažování objemu zásobního prostoru z deterministického řešení do výpočtu vychází velikost směrodatné odchylky pro dané povodňové průtoky stejně, obdobně jako rozptyl a koeficient asymetrie.

## 5.5 KOMBINACE NEJISTOT

### 5.5.1. Objemy nádrže

Při různých kombinacích nejistot můžeme pokrýt a definovat nejpessimističtější výsledky objemu nádrže. Velikosti se díky načítání směrodatných odchylek mohou značně lišit od

deterministického řešení. Hodnoty celkových objemů nádrže v *Tabulkách 21 a 22* byly získány podle vzorců (22), (23), (24), vstupními podklady pro výsledky v uvedených tabulkách byly *Data 1*. Hodnoty celkových objemů nádrže v *Tabulkách 23 a 24* byly získány ze vstupních podkladů *Data 2*.

$$V_{c,min} = V_s + ((\mu(V_z) - 3\sigma(V_z)) + (\mu(V_r) - 3\sigma(V_r))) \quad (22)$$

$$V_{c,\mu} = V_s + \mu(V_z) + \mu(V_r) \quad (23)$$

$$V_{c,max} = V_s + ((\mu(V_z) + 3\sigma(V_z)) + (\mu(V_r) + 3\sigma(V_r))) \quad (24)$$

Statistické charakteristiky zásobního objemu vychází z *Tabulky 4*, jejíž hodnoty jsou ovlivněné nejistotami. Z *Tabulky 20* jsou převzaty hodnoty statistických charakteristik objemu retenčního prostoru, které byly dále využity v rovnicích (22), (23) a (24).

**Tabulka 21 – Maximální celkové objemy nádrže pro Data 1**

i	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$V_{c,min}$	$V_{c,\mu}$	$V_{c,max}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2	22 507 944	1 135 966	32 587 371	36 657 067	40 726 764
5	22 506 662	1 134 634	32 590 085	36 655 785	40 721 485
8	22 513 296	1 140 051	32 580 466	36 662 419	40 744 372
9	22 509 496	1 135 812	32 589 385	36 658 619	40 727 853
13	22 513 914	1 140 629	32 579 352	36 663 037	40 746 723
16	22 513 764	1 139 409	32 582 861	36 662 887	40 742 913
17	22 512 546	1 138 314	32 584 929	36 661 669	40 738 409
20	22 516 006	1 142 107	32 577 010	36 665 129	40 753 248
25	22 478 448	1 131 522	32 571 205	36 627 571	40 683 937

V *Tabulce 21* jsou vybrány varianty kombinací nejistot, kde zásobní objemy dosahovaly maxim při průtokové řadě *Data 1*. Nejvyšších hodnot bylo dosahováno při variantě stanovení nejistot na přítoku do nádrže na hodnotu 10 %. Ve výpočtech byly uvažovány i nejistoty batygrafických křivkách a výparu z vodní hladiny. Maximální hodnoty zásobního objemu v tomto případě bylo dosaženo ve variantě č. 20, kde nejistoty byly uvažovány pouze na přítoku, ostatní vstupní data nebyla zatížena nejistotami. K objemu zásobního prostoru byl přičten i objem retenčního prostoru. Celkový objem nádrže se tak pohybuje v rozpětí <32 577 010 m<sup>3</sup>; 40 753 248 m<sup>3</sup>>, tj. v nadmořských výškách <485,754 m n. m.; 490,550 m n. m.>.

**Tabulka 22 – Minimální celkové objemy nádrže pro Data 1**

i	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$V_{c,min}$	$V_{c,\mu}$	$V_{c,max}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>

i	$\mu(V_z)$	$\sigma(V_z)$	$V_{c,min}$	$V_{c,\mu}$	$V_{c,max}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
21	21 827 964	71 280	35 101 448	35 977 087	36 852 726
26	21 785 514	40 229	35 152 152	35 934 637	36 717 123
27	21 787 632	8 046	35 250 818	35 936 755	36 622 692
28	21 782 930	80 452	35 028 897	35 932 053	36 835 209
29	21 785 830	23 676	35 202 125	35 934 953	36 667 781
30	21 777 822	104 084	34 952 895	35 926 945	36 900 995
31	21 786 376	22 315	35 206 756	35 935 499	36 664 242
32	21 785 698	45 386	35 136 865	35 934 821	36 732 777

V *Tabulce 22* jsou vybrány varianty kombinací nejistot, kde zásobní objemy dosahovaly minim při průtokové řadě *Data 1*. Nejnižších hodnot bylo dosahováno při variantě neuvažování nejistot na přítoku, tj. 0 %. Výsledné hodnoty tak ovlivňovaly nejistoty na batygrafických křivkách a výparu z vodní hladiny. Nejmenšího ovlivnění výpočtu došlo ve variantě č. 27, kde nejistoty byly nastaveny pouze v případě výparu z vodní hladiny (1 %), nejistoty na ostatních vstupech byly zanedbány. K objemu zásobního prostoru byl přičten i objem retenčního prostoru. Celkový objem nádrže s minimálním ovlivněním se tak pohybuje v rozpětí <35 250 818 m<sup>3</sup>; 36 622 692 m<sup>3</sup>>, tj. v nadmořských výškách <487,357 m n. m.; 488,179 m n. m.>.

**Tabulka 23** - Maximální celkové objemy nádrže pro *Data 2*

i	$V_z$	$\sigma$	$V_{c,min}$	$V_{c,\mu}$	$V_{c,max}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2	22 507 944	1 135 966	32 977 680	36 761 568	40 545 456
5	22 506 662	1 134 634	32 980 395	36 760 286	40 540 177
8	22 513 296	1 140 051	32 970 776	36 766 920	40 563 064
9	22 509 496	1 135 812	32 979 695	36 763 120	40 546 545
13	22 513 914	1 140 629	32 969 661	36 767 538	40 565 415
16	22 513 764	1 139 409	32 973 171	36 767 388	40 561 605
17	22 512 546	1 138 314	32 975 239	36 766 170	40 557 102
20	22 516 006	1 142 107	32 967 320	36 769 630	40 571 940
25	22 478 448	1 131 522	32 961 515	36 732 072	40 502 629

V *Tabulce 23* jsou vybrány varianty kombinací nejistot, kde zásobní objemy dosahovaly maxim při průtokové řadě *Data 2*. Nejvyšších hodnot bylo dosahováno při variantě stanovení nejistot na přítoku do nádrže na hodnotu 10 %. Ve výpočtech byly uvažovány i nejistoty batygrafických křivkách a výparu z vodní hladiny. Maximální hodnoty zásobního objemu a jejího ovlivnění bylo dosaženo ve variantě č. 20, kde nejistoty byly uvažovány pouze na

přítoku, ostatní vstupní data nebyla zatížena nejistotami. K objemu zásobního prostoru byl přičten i objem retenčního prostoru. Celkový objem nádrže se tak pohybuje v rozpětí  $\langle 32\,967\,320\text{ m}^3; 40\,571\,940\text{ m}^3 \rangle$ , tj. v nadmořských výškách  $\langle 485,988\text{ m n. m.}; 490,459\text{ m n. m.} \rangle$ .

**Tabulka 24** - Minimální celkové objemy nádrže pro Data 2

i	$V_z$	$\sigma$	$V_{c,min}$	$V_{c,\mu}$	$V_{c,max}$
	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$	$\text{m}^3$
21	21 827 964	71 280	35 491 758	36 081 588	36 671 419
26	21 785 514	40 229	35 542 461	36 039 138	36 535 815
27	21 787 632	8 046	35 641 128	36 041 256	36 441 385
28	21 782 930	80 452	35 419 207	36 036 554	36 653 902
29	21 785 830	23 676	35 592 435	36 039 454	36 486 473
30	21 777 822	104 084	35 343 205	36 031 446	36 719 687
31	21 786 376	22 315	35 597 066	36 040 000	36 482 935
32	21 785 698	45 386	35 527 175	36 039 322	36 551 469

V *Tabulce 24* jsou vybrány varianty kombinací nejistot, kde zásobní objemy dosahovaly minim při průtokové řadě *Data 2*. Nejnižších hodnot bylo dosahováno při variantě neuvažování nejistot na přítoku, tj. 0 %. Výsledné hodnoty tak ovlivňovaly nejistoty na batygrafických křivkách a výparu z vodní hladiny. Nejmenšího ovlivnění výpočtu došlo ve variantě č. 27, kde nejistoty byly nastaveny pouze v případě výparu z vodní hladiny (1 %), nejistoty na ostatních vstupech byly zanedbány. K objemu zásobního prostoru byl přičten i objem retenčního prostoru. Celkový objem nádrže s minimálním ovlivněním se tak pohybuje v rozpětí  $\langle 35\,641\,128\text{ m}^3; 36\,441\,385\text{ m}^3 \rangle$ , tj. v nadmořských výškách  $\langle 487,591\text{ m n. m.}; 488,070\text{ m n. m.} \rangle$ .

Hodnoty celkových objemů nádrže v *Tabulkách 25, 26, 27, 28* byly vypočteny dle uvedených vzorců (25), (26), (27), (28). Objemy zásobního prostoru byly získány v programu UNCE\_RESERVOIR, ke kterým byly pak přičteny směrodatné odchylky. Objemy retenčního prostoru byly získány v programu HYDROG, které byly také ovlivněny směrodatnou odchylkou.

$$V_{c,1} = V_s + \mu(V_z) + (\mu(V_r) + 3\sigma(V_r)) \quad (25)$$

$$V_{c,2} = V_s + \mu(V_z) + (\mu(V_r) - 3\sigma(V_r)) \quad (26)$$

$$V_{c,3} = V_s + (\mu(V_z) - 3\sigma(V_z)) + \mu(V_r) \quad (27)$$

$$V_{c,4} = V_s + (\mu(V_z) + 3\sigma(V_z)) + \mu(V_r) \quad (28)$$

V rovnicích (25) a (26) jsou upřednostněny hodnoty retenčního prostoru a jejich ovlivnění nejistotami. V rovnicích (27) a (28) byly zatíženy nejistotami a upřednostněny hodnoty objemů zásobního prostoru, prostor retenční nebyl nijak ovlivněn do výsledného řešení.

**Tabulka 25** - Varianty maximálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 1

i	$V_{c,1}$	$V_{c,2}$	$V_{c,3}$	$V_{c,4}$
	$m^3$	$m^3$	$m^3$	$m^3$
2	37 318 866	35 995 268	33 249 170	40 064 964
5	37 317 584	35 993 986	33 251 885	40 059 686
8	37 324 218	36 000 620	33 242 265	40 082 573
9	37 320 418	35 996 820	33 251 185	40 066 054
13	37 324 836	36 001 238	33 241 151	40 084 923
16	37 324 686	36 001 088	33 244 660	40 081 114
17	37 323 468	35 999 870	33 246 728	40 076 610
20	37 326 928	36 003 330	33 238 810	40 091 449
25	37 289 370	35 965 772	33 233 005	40 022 138

V Tabulce 25 jsou uvedeny hodnoty maximálních celkových objemů nádrže, které byly získány ze vstupních dat zatížených nejistotami. Maximálních hodnot bylo dosaženo v případech nejistot na přítoku do nádrže o velikosti 10 %. Nejvyšší hodnoty nabývá ve variantě č. 20. V případě uvažování ztrát a zatížení nejistot na zásobním objemu je hodnota  $40\,091\,449\ m^3$ , v případě nejistot na retenčním objemu je hodnota rovna  $37\,326\,928\ m^3$ . Pokud by byl upřednostněn zásobní objem s vlivem nejistot před retenčním objemem, rozdíl v celkovém objemu nádrže je  $2\,764\,521\ m^3$ , procentuálně 7,41 %.

**Tabulka 26** - Varianty minimálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 1

i	$V_{c,1}$	$V_{c,2}$	$V_{c,3}$	$V_{c,4}$
	$m^3$	$m^3$	$m^3$	$m^3$
21	36 638 886	35 315 288	35 763 247	36 190 927
26	36 596 436	35 272 838	35 813 951	36 055 323
27	36 598 554	35 274 956	35 912 617	35 960 893
28	36 593 852	35 270 254	35 690 696	36 173 410
29	36 596 752	35 273 154	35 863 925	36 005 982
30	36 588 744	35 265 146	35 614 694	36 239 196
31	36 597 298	35 273 700	35 868 555	36 002 443
32	36 596 620	35 273 022	35 798 665	36 070 978

V Tabulce 26 jsou uvedeny hodnoty minimálních celkových objemů nádrže, které byly získány ze vstupních dat zatížených nejistotami. Minimálních hodnot bylo dosaženo v případech zanedbání nejistot na přítoku, tj. 0 %. Nejnižší hodnoty nabývá ve variantě č. 30.

V případě uvažování ztrát a zatížení nejistot na zásobním objemu je hodnota 35 614 694 m<sup>3</sup>, v případě nejistot na retenčním objemu je hodnota rovna 35 265 146 m<sup>3</sup>. Pokud by byl upřednostněn zásobní objem s vlivem nejistot před retenčním objemem, rozdíl v celkovém objemu nádrže je 349 548 m<sup>3</sup>, procentuálně 0,99 %.

**Tabulka 27** - Varianty maximálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 2

i	$V_{c,1}$	$V_{c,2}$	$V_{c,3}$	$V_{c,4}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2	37 137 559	36 385 578	33 353 671	40 169 465
5	37 136 277	36 384 296	33 356 386	40 164 187
8	37 142 911	36 390 930	33 346 766	40 187 074
9	37 139 111	36 387 130	33 355 686	40 170 555
13	37 143 529	36 391 548	33 345 652	40 189 424
16	37 143 379	36 391 398	33 349 162	40 185 615
17	37 142 161	36 390 180	33 351 229	40 181 111
20	37 145 621	36 393 640	33 343 311	40 195 950
25	37 108 063	36 356 082	33 337 506	40 126 639

V Tabulce 27 jsou uvedeny hodnoty maximálních celkových objemů nádrže, které byly získány ze vstupních dat zatížených nejistotami. Maximálních hodnot bylo dosaženo v případech nejistot na přítoku do nádrže o velikosti 10 %. Nejvyšší hodnoty nabývá ve variantě č. 20. V případě uvažování ztrát a zatížení nejistot na zásobním objemu je hodnota 40 195 950 m<sup>3</sup>, v případě nejistot na retenčním objemu je hodnota rovna 37 145 621 m<sup>3</sup>. Pokud by byl upřednostněn zásobní objem s vlivem nejistot před retenčním objemem, rozdíl v celkovém objemu nádrže je 3 050 329 m<sup>3</sup>, procentuálně 8,21 %.

**Tabulka 28** - Varianty minimálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 2

i	$V_{c,1}$	$V_{c,2}$	$V_{c,3}$	$V_{c,4}$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
21	36 457 579	35 705 598	35 867 748	36 295 428
26	36 415 129	35 663 148	35 918 452	36 159 824
27	36 417 247	35 665 266	36 017 118	36 065 394
28	36 412 545	35 660 564	35 795 197	36 277 911
29	36 415 445	35 663 464	35 968 426	36 110 483
30	36 407 437	35 655 456	35 719 195	36 343 697
31	36 415 991	35 664 010	35 973 056	36 106 944
32	36 415 313	35 663 332	35 903 166	36 175 479

V Tabulce 28 jsou uvedeny hodnoty minimálních celkových objemů nádrže, které byly získány ze vstupních dat zatížených nejistotami. Minimálních hodnot bylo dosaženo



v případech zanedbání nejistot na přítoku, tj. 0 %. Nejnižší hodnoty nabývá ve variantě č. 30. V případě uvažování ztrát a zatížení nejistot na zásobním objemu je hodnota 35 719 195 m<sup>3</sup>, v případě nejistot na retenčním objemu je hodnota rovna 35 655 456 m<sup>3</sup>. Pokud by byl upřednostněn zásobní objem s vlivem nejistot před retenčním objemem, rozdíl v celkovém objemu nádrže je 63 739 m<sup>3</sup>, procentuálně 0,18 %.

## 6. SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky z programu HYDROG jsou vyexportovány a přiloženy ve formě elektronické přílohy k diplomové práci na CD.

Dle výsledků je zřejmé, že nejvíce vstupní data ovlivňují nejistoty na přítoku do nádrže. Jejich uvažování ve výpočtech zásobního objemu nádrže může způsobit v **Úloze typu  $V_z$  ( $O_p$ ;  $P = 100$  %)** rozdíl výsledků až v řádech sta tisíců  $m^3$ . Druhým největším ovlivňujícím faktorem jsou nejistoty při uvažování výparu z volné hladiny. Zde se může pohybovat rozdíl až do jednotek tisíců  $m^3$ . Nejmenší vliv by měly mít nejistoty na batygrafických čarách, kde byl rozdíl v zásobních objemech ve stovkách  $m^3$ , výjimečně až tisících  $m^3$ . Při kombinaci některých nebo všech nejistot se mohou dané nejistoty „vykrátit“. Zatímco jeden typ může výsledek snížit, druhý typ ho může naopak navyšovat, a proto při uvažování kombinace všech nejistot může výsledná hodnota vycházet nižší, než při počítání jednoho samotného typu nejistot. Zjednodušeně by se dalo říct, že při vynechání nejistot na přítoku nebo jejich stanovení na spodní hranici (např. 1 %) a jakékoliv kombinaci na batygrafii a výparu, se objem zásobního prostoru pohybuje na minimu.

Např. pro variantu nejistoty na přítoku 10 % a  $O_p = 1,509 m^3/s$  a uvažování se ztrátami vychází zásobní objem nádrže  $22\,516\,006 \pm 3\,426\,320 m^3$ , procentuálně  $\pm 15,22$  %. Zásobní objem se pohybuje v rozmezí hodnot  $V_z \in \langle 19\,089\,686 m^3; 25\,942\,326 m^3 \rangle$ . Pro stejný případ, ale uvažováním bez ztrát, je zásobní objem  $21\,801\,584 \pm 3\,047\,037 m^3$ , procentuálně  $\pm 13,98$  %. Zásobní objem se tak může pohybovat v rozmezí hodnot  $V_z \in \langle 18\,754\,547 m^3; 24\,848\,621 m^3 \rangle$ .

Při stejné kombinaci nastavení nejistot a variantě změny nalepšeného odtoku na  $O_p = 1,8 m^3/s$  se zásobní objem bez uvažování ztrát zvýšil na  $42\,131\,148 \pm 2\,593\,767 m^3$ , procentuálně  $\pm 6,16$  %. Zásobní objem se tak může pohybovat v rozmezí hodnot  $V_z \in \langle 39\,537\,381 m^3; 44\,724\,915 m^3 \rangle$ . Při uvažování ztrát je zásobní objem nádrže  $45\,421\,688 \pm 3\,153\,783 m^3$ , procentuálně pak  $\pm 6,94$  %. Zásobní objem může nabývat hodnot  $V_z \in \langle 42\,267\,905 m^3; 48\,575\,471 m^3 \rangle$ .

Pokud ovšem vezmeme do úvahy nejistoty na batygrafii (15 %) a výparu z volné hladiny (10 %) a vynecháme nejistoty na přítoku pro  $O_p = 1,509 m^3/s$ , hodnota zásobního objemu se ztrátami je  $21\,777\,822 \pm 312\,249 m^3$ , procentuálně  $\pm 1,43$  %. Zásobní objem pak může nabývat hodnot  $V_z \in \langle 21\,714\,801 m^3; 21\,856\,859 m^3 \rangle$ . Bez uvažování ztrát je pro stejný případ zásobní objem  $20\,979\,548 \pm 114 m^3$ , procentuálně je rozptyl zanedbatelně malý.

Zásobní objem se tak může pohybovat v rozmezí hodnot  $V_z \in \langle 20\,979\,434 \text{ m}^3; 20\,979\,662 \text{ m}^3 \rangle$ .

Při zvýšení nalepšeného odtoku na hodnotu např.  $O_p = 1,725 \text{ m}^3/\text{s}$  a stejné kombinaci nejistot se zásobní objem nádrže a uvažování varianty se ztrátami zvýšil na  $36\,906\,528 \pm 805\,683 \text{ m}^3$ , procentuálně  $\pm 2,18 \%$ . Zásobní objem tak může mít rozpětí  $V_z \in \langle 36\,100\,845 \text{ m}^3; 37\,712\,211 \text{ m}^3 \rangle$ . Bez ztrát je pak zásobní objem nádrže  $34\,279\,504 \pm 228 \text{ m}^3$ , procentuálně je pak rozptyl hodnot zanedbatelně malý. Zásobní objem tak může nabývat hodnot  $V_z \in \langle 34\,279\,276 \text{ m}^3; 34\,279\,732 \text{ m}^3 \rangle$ .

Pro jednotlivé varianty zatížení nejistot byly vypočítány i výsledky **Úlohy typu P ( $O_p$ ;  $V_z$ )**. Hodnota zásobního objemu byla v programu nastavena do následujícího výpočtu na  $V_z = 22\,516\,006 \text{ m}^3$ ,  $V_m = 2\,796\,845.25 \text{ m}^3$  a  $O_p = 1,509 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při stanovení nejistot na přítoku 10 % zabezpečení podle trvání v uvažování ztrát vyšla  $P_t = 99,771 \pm 0,495 \%$  a  $P_d = 99,978 \pm 0,093$ . Bez ztrát je zabezpečení  $P_t = 99,865 \pm 0,300 \%$  a  $P_d = 99,994 \pm 0,045 \%$ . Při změně nalepšeného odtoku na hodnotu např.  $O_p = 1,725 \text{ m}^3/\text{s}$  je zabezpečení podle trvání  $P_t = 95,853 \pm 1,037 \%$  a  $P_d = 98,62 \pm 0,371 \%$  při uvažování varianty se ztrátami. Bez ztrát při stejné variantě je zabezpečení  $P_t = 96,459 \pm 0,965 \%$  a  $P_d = 98,885 \pm 0,358 \%$ .

V dalším výpočtu byl nastaven zásobní objem nádrže na  $V_z = 21\,777\,822 \text{ m}^3$ ,  $V_m = 2\,796\,845.25 \text{ m}^3$  a  $O_p = 1,509 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při nejistotách na batygrafických čarách (15 %), výparu z volné hladiny (10 %) a uvažování ztrát je zabezpečení podle trvání  $P_t = 99,665 \pm 0,105 \%$  a podle dodávky vody  $P_d = 99,981 \pm 0,024 \%$ . V případě neuvažování ztrát ve výpočtu vychází zabezpečení podle trvání  $P_t = 99,912 \pm 0,001 \%$  a  $P_d = 100 \%$ . Při změně  $O_p$  na hodnotu např.  $1,725 \text{ m}^3/\text{s}$  a bez uvažování ztrát je zabezpečení  $P_t = 96,000 \pm 0,0002 \%$  a  $P_d = 98,760 \pm 0,0005 \%$ . Pokud ovšem budeme uvažovat ztráty, vychází její zabezpečení  $P_t = 95,654 \pm 0,320 \%$  a  $P_d = 98,521 \pm 0,130 \%$ . Podle výsledné zabezpečení lze vodní nádrž zařadit do tříd významnosti, viz *Tabulka 29*.

**Tabulka 29** - Kategorie zařazení vodní nádrže dle významnosti

Třída významnosti	A	B	C	D
Zabezpečení podle trvání plné dodávky [%]	$\geq 99,5$	$\geq 98,5$	$\geq 97,5$	$\geq 95,0$

Nejoptimálnějším řešením je varianta se součinitelem nalepšení  $\alpha = 0,7$ , hlavním důkazem jsou výsledky úlohy č. 2, kde většina hodnot vyšla vyšší než 99,5 %. Vodní nádrž tak může být zařazena dle významnosti do třídy A, která splňuje požadavky pro dodávku vody náročných oblastí, např. vodovody pro více než 150 tisíc obyvatel, jaderné a tepelné elektrárny

nad 500 MW, vybrané průmyslové podniky celostátního významu. Při zvýšení součinitele nalepšení a tedy i nalepšeného odtoku dochází ke zvýšení zásobního objemu. S narůstajícím objemem nádrže se pak častěji vyskytují poruchy v dodávce, čímž pak snižují zabezpečení podle trvání a dodávky vody. Pro reálné řešení je vhodné uvažovat variantu s ovlivněním ztrát.

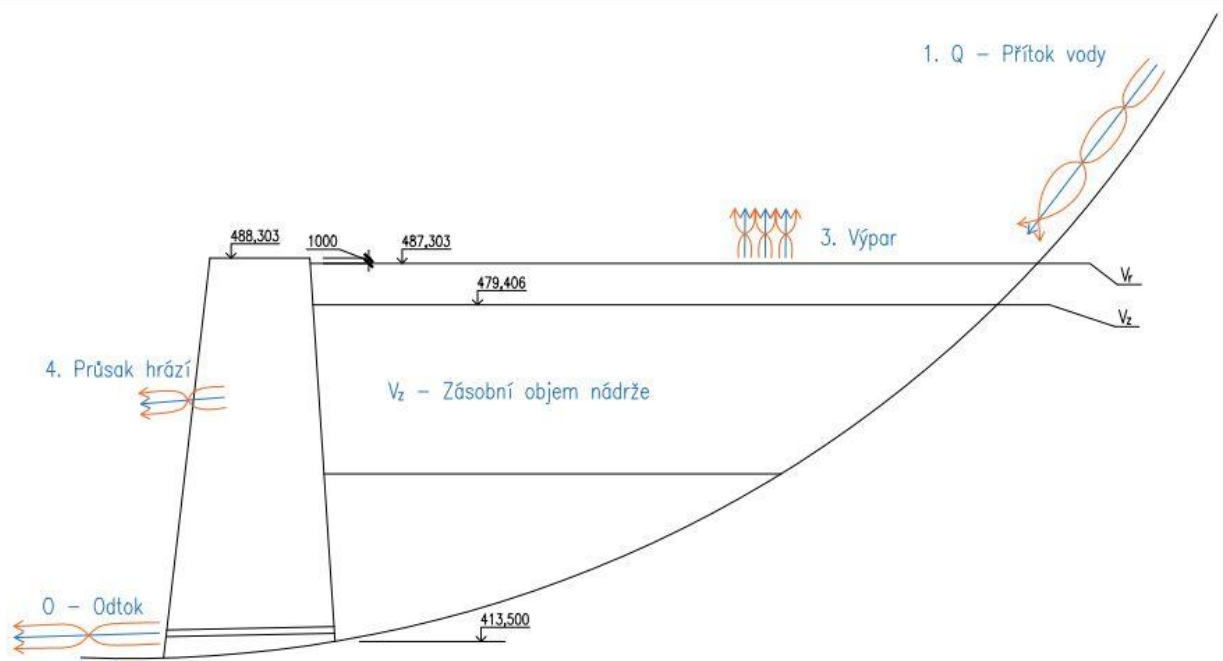
Z pohledu ochranné funkce nádrže byly dosažené výsledky následující. Díky stanovení dvou typů náhodných hydrogramů povodně existují dva výsledky a návrhy, jejich rozdíl je právě určen diametrálním stanovením hodnot povodňových průtoků. Hodnoty celkového objemu nádrže pro návrhovou povodeň  $Q_{100}$  a vstupní data *Data 1* se pohybuje v rozpětí  $V \in <24\,192\,970\text{ m}^3; 34\,098\,711\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <479,759\text{ m}; 486,666\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 3\,835\,892\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 507\,883\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 13,24\%$ . Při kontrolní povodni  $Q_{1000}$  objem nádrže je v rozpětí  $V \in <30\,449\,717\text{ m}^3; 39\,847\,710\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <484,366\text{ m}; 490,094\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 9\,838\,764\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 423\,258\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 4,30\%$ . Při  $Q_{10000}$  objem nádrže nabývá hodnot  $V \in <32\,571\,205\text{ m}^3; 40\,753\,248\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <485,751\text{ m}; 490,550\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 11\,352\,278\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 220\,660\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 1,94\%$ . Pro vstupní data *Data 2* a zatížení návrhovou povodní  $Q_{100}$  objem nádrže se pohybuje v rozpětí  $V \in <25\,480\,751\text{ m}^3; 32\,705\,885\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <480,743\text{ m}; 485,831\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 3\,783\,370\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 61\,115\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 1,62\%$ . Pro kontrolní povodeň  $Q_{1000}$  je objem  $V \in <31\,504\,392\text{ m}^3; 39\,033\,404\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <485,111\text{ m}; 489,624\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 9\,958\,949\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 111\,761\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 1,12\%$ . Pro  $Q_{10000}$  objem nádrže nabývá hodnot  $V \in <32\,961\,515\text{ m}^3; 40\,571\,940\text{ m}^3>$ , tj.  $H \in <485,985\text{ m}; 490,460\text{ m}>$ . Z pohledu statistického vyhodnocení se pak retenční objem neovladatelný byl  $\mu(V_r) = 11\,456\,779\text{ m}^3$ ,  $\sigma(V_r) = 125\,330\text{ m}^3$  což odpovídalo  $\pm 1,09\%$ . Vhodnějšími podklady byly určeny *Data 1*, proto konečný návrh velikosti hráze vychází z výpočtů objemů pro tyto data.

Samotný návrh nádrže se dá posuzovat ze dvou hlavních hledisek, a to ekonomického a bezpečnostního. Společně s ekonomickým hlediskem je spojeno časové hledisko. Z hlediska ekonomického (viz *Obrázek 18*) by byl nejideálnější návrh takové nádrže, která pojme minimální stanovený objem nádrže. Vybudování takové hráze by nebylo na čas tak náročné,

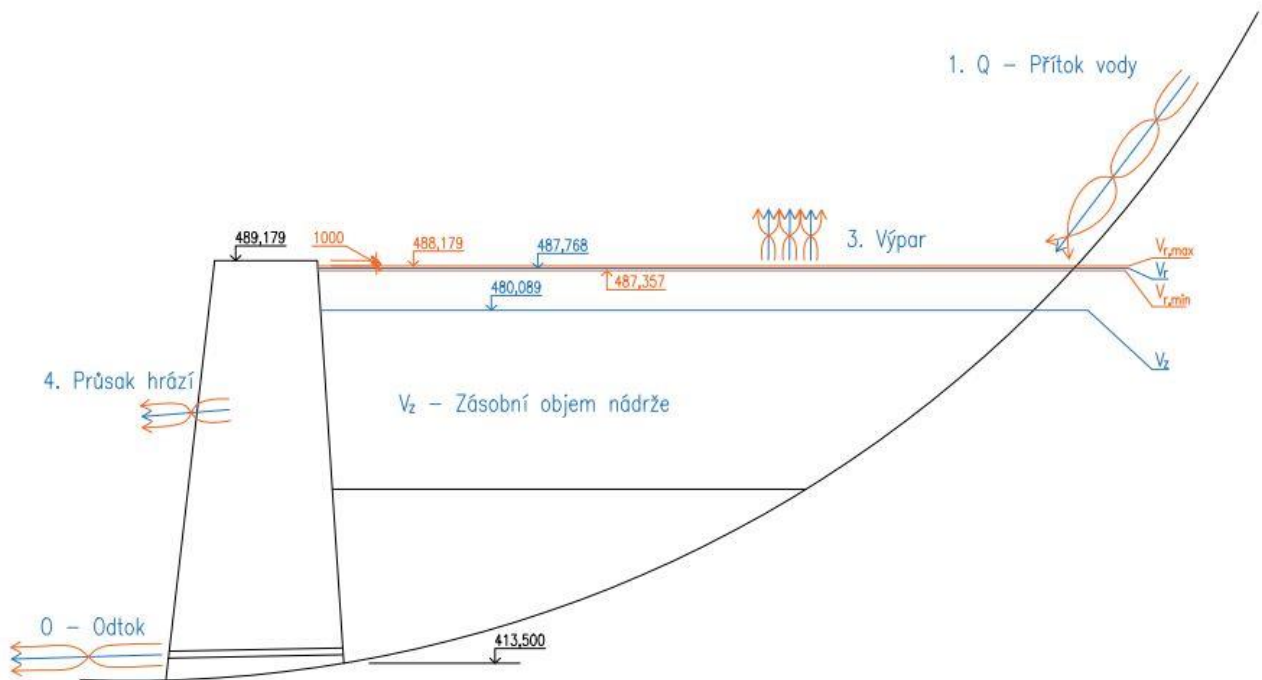
jako provedení objemově mohutnější a větší hráze. Objem nádrže pro tuto variantu je  $35\,936\,755 \pm 685\,937 \text{ m}^3$ , může tedy kulminovat v rozmezí  $V \in <35\,250\,818 \text{ m}^3; 36\,622\,692 \text{ m}^3>$  (viz *Tabulka 22*). Nadmořská výška střední hodnoty je 487,768 m n. m., rozpětí tedy může být  $H \in <487,357 \text{ m n. m.}; 488,179 \text{ m n. m.}>$ . Rozdíl minimální a maximální vodní hladiny v nádrži činí 0,822 m. Úroveň koruny hráze musí být navýšena oproti vodní hladině o určitou bezpečnostní výšku v závislosti na tom, zda je na koruně umístěn vlnolam. V tomto případě jsem zjednodušeně odhadl bezpečnostní výšku 1 m, tj. varianta bez umístění vlnolamu. Tedy koruna hráze vycházející z maximální dosažené hladiny vody v nádrži by byla 489,179 m n. m.. Výška hráze pro tuto variantu bude 75,679 m.

Z bezpečnostního hlediska (viz *Obrázek 19*) navrhuji nádrž na maximální objem nádrže. Pro  $Q_{10000}$  vychází  $36\,665\,129 \pm 4\,088\,119 \text{ m}^3$ , objem se tak může pohybovat v rozpětí hodnot  $V \in <32\,577\,010 \text{ m}^3; 40\,753\,248 \text{ m}^3>$  (viz *Tabulka 21*). Výškově je základní úroveň na hodnotě 488,100 m n. m., rozpětí je pak  $H \in <485,754 \text{ m n. m.}; 490,550 \text{ m n. m.}>$ . Úroveň koruny hráze je opět navýšena o 1 m oproti výšce kontrolní povodně, tj. 491,550 m n. m.. Výška hráze pro tuto variantu bude 78,05 m a v porovnání s ekonomicky výhodnější variantou je o 2,371 m vyšší.

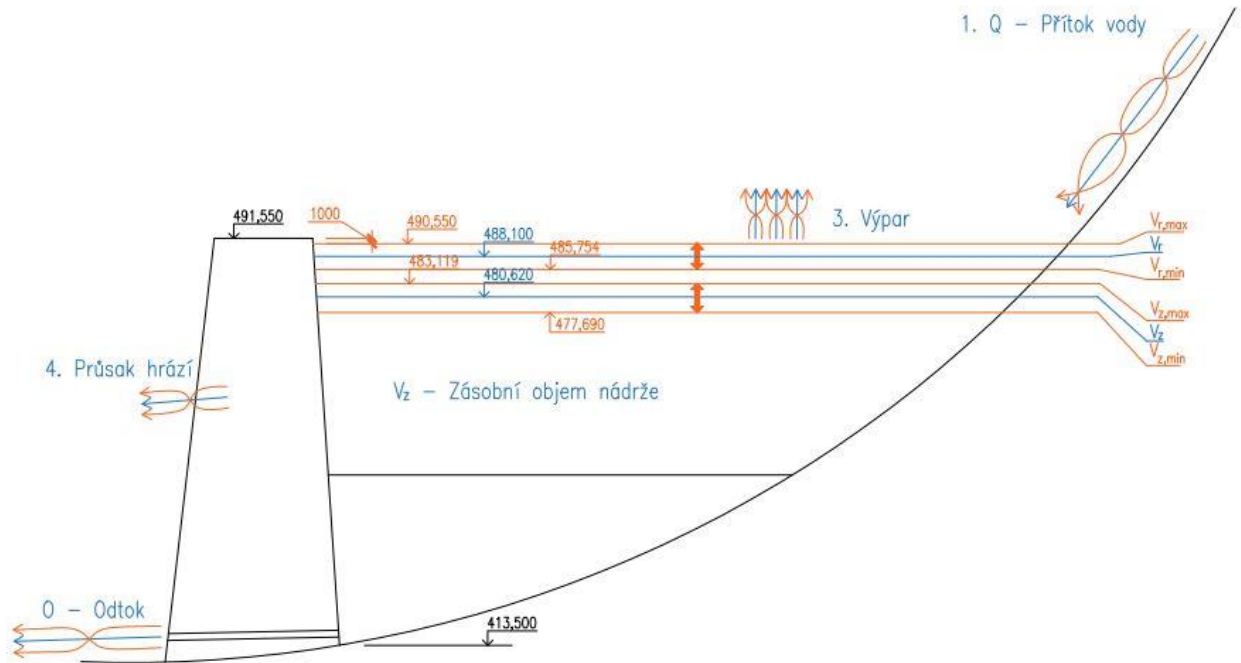
Poslední variantou (viz *Obrázek 20*) určení návrhu hráze je kombinace vhodného ekonomického a zároveň i bezpečnostního hlediska. Tato varianta by měla objemově pokrýt většinu kombinací pro stanovení objemu nádrže (viz *5.5 KOMBINACE NEJISTOT*). Hodnota objemu pro návrh vychází z varianty stanovení nejistot č. 14 a je  $36\,193\,915 \pm 2\,603\,849 \text{ m}^3$ , objem tak bude v rozmezí  $V \in <33\,590\,067 \text{ m}^3; 38\,797\,764 \text{ m}^3>$ . Výškově je střední úroveň na hodnotě 487,922 m n. m., objem bude kulminovat pak v rozpětí  $H \in <486,361 \text{ m n. m.}; 489,483 \text{ m n. m.}>$ . Úroveň koruny hráze je opět navýšena o 1 m oproti výšce kontrolní povodně, tj. 490,483 m n. m.. Výška hráze pro tuto variantu bude 76,983 m a v porovnání s ekonomicky výhodnější variantou je o 1,304 m vyšší a s bezpečnější variantou o 1,067 m nižší.



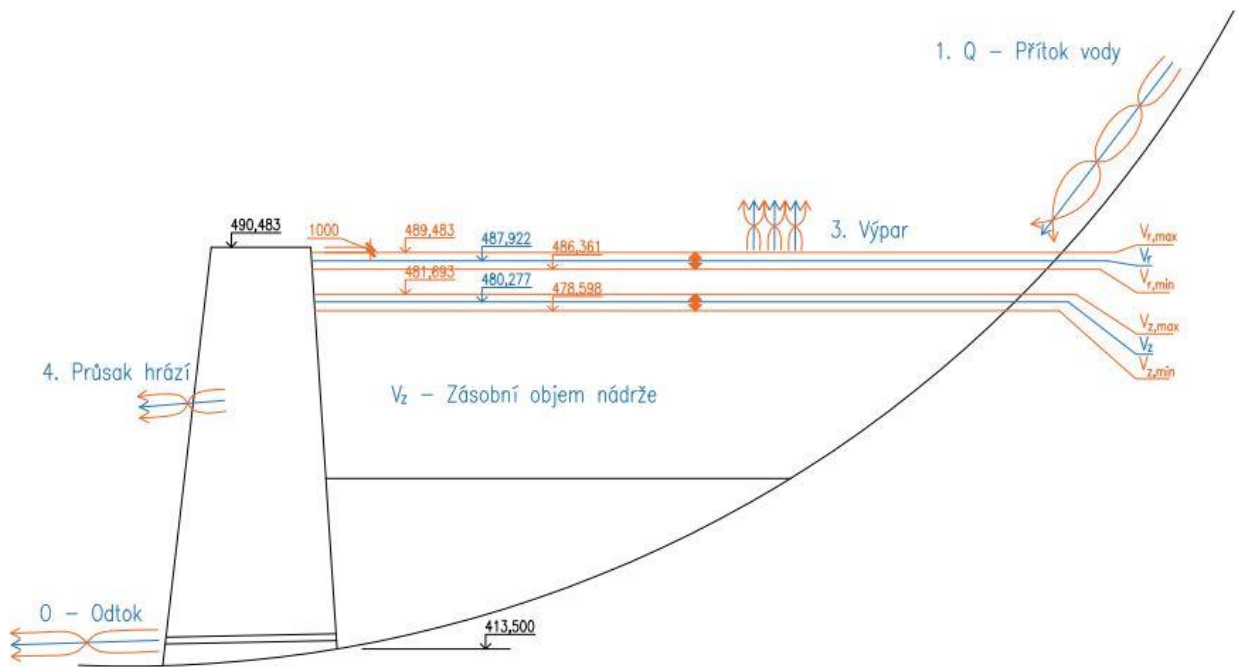
**Obrázek 17** - Vodohospodářské schéma nádrže při  $Q_{10000}$  - deterministické řešení



**Obrázek 18** - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při  $Q_{10000} - min$



**Obrázek 19** - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při  $Q_{10000} - \text{max}$



**Obrázek 20** - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při  $Q_{10000} - \text{návrh}$

## 7. ZÁVĚR

V *Tabulce 30* jsou shrnuty výsledky variant nádrží, které vycházely z *kapitoly 6 Shrnutí výsledků*, kde jsou vykresleny i zjednodušená schémata vodohospodářského řešení nádrží. Hodnoty objemů ve výše uvedené tabulce jsou porovnány s hodnotami deterministického řešení. Objemy stálého nadržení i mrtvého prostoru jsou pro všechny varianty konstantní. V případě návrhu minimální varianty hráze by její výška byla 75,679 m, tj. o 0,876 m vyšší než původní deterministické řešení. V maximálním řešení nádrže by výška hráze byla 78,050 m, což je v porovnání s deterministickým řešením o 3,247 m vyšší. Poslední, třetí varianta se pohybuje právě mezi minimálním a maximálním řešením. Výška hráze pro poslední variantu je 76,983 m, tj. o 2,180 m vyšší než deterministické řešení.

**Tabulka 30** - Konečné shrnutí výsledků variant nádrží pro kontrolní povodeň  $Q_{10000}$

	$V_z$		$V_r$		$V_c$		$H_{vh}$	$H_{hr}$	$h_{hr}$	$\Delta h_{hr}$
	$m^3$	%	$m^3$	%	$m^3$	%				
Determ.	21 000 000	-	11 364 455	-	35 161 300	-	487.303	488.303	74.803	-
Min	21 811 770	3.87	12 014 078	5.72	36 622 692	4.16	488.179	489.179	75.679	0.876
Návrh	23 986 842	14.22	12 014 078	5.72	38 797 764	10.34	489.483	490.483	76.983	2.180
Max	25 942 327	23.53	12 014 078	5.72	40 753 248	15.90	490.55	491.550	78.050	3.247

Dle mého názoru je třetí varianta řešení neoptimálnější, i přestože má několik negativních vlastností. Hlavní negativní charakteristikou je především fakt, že nedokáže pokrýt sto procent výskytu kombinací nejistot a nepřevedla by ty nejpesimističtější varianty a nebyla by zaručena stoprocentní bezpečnost obyvatel žijících v blízkém okolí nádrže. V analýze návrhu nádrže byly nakombinovány nejrůznější varianty nejistot na přítoku, které by právě navrhovaná varianta bezpečně převedla. Výhodou by naopak byla její ekonomická a časová úspora oproti bezpečnější variantě nádrže. Díky nižší výšce, a tedy i objemu, by samotné provedení prací nebylo tolik časově náročné, jako v případě druhé varianty. A podle rčení „čas jsou peníze“, by došlo i k následné finanční úspoře, kterou zajisté uvítá každý investor.

Podrobnější výpočet byl proveden na jediné variantě nádrže, tedy variantě B na řece Krupé. Analýza nebyla provedena pro ostatní varianty, a tudíž nelze porovnat detailní analýzy výpočtu s posuzovanou možností. Vzhledem k odlišně velkému přítoku do nádrže a rozdílné morfologii území se budou lišit i objemy nádrží. Rozdílné budou též nadmořské výšky umístění závěrových profilů a dalších faktorů ovlivňujících velikost zásobního objemu. Pro určení nejideálnější varianty nádrží a stanovení nalepšeného odtoku by bylo vhodné provedení podrobnější analýzy.



Tato práce měla za cíl prokázat návrh velikosti funkčního objemu nádrže při zatížení vstupních dat hydrologickými, morfologickými a provozními nejistotami, což se podařilo obhájit. Nejistoty mají značný vliv jak na samotném návrhu jednotlivých prostorů, tak i na řízení vodní nádrže, velikosti nalepšeného odtoku a jejich zabezpečení.

Některé nádrže jsou navrženy a počítány s vlivem nejistot, ale velikost zahrnutí nejistot není dostatečná, proto může dojít k jejich chybnému zařazení do kategorie nádrží dle významnosti podle ČSN 75 2405. Stejným důvodem může být i návrh objemů bez uvažování nejistot a jejich ovlivnění na vstupních datech.

Pokud bychom chtěli dostat návrh na stranu bezpečnou, je vhodné uvažovat zásobní objemy získané ze vstupních dat zatížené nejistotami na přítoku do nádrže deseti procenty. Ve všech výpočtech vychází zabezpečení podle trvání  $P_t$  menší než podle dodávky vody  $P_d$ . Se vzrůstajícím součinitelem nalepšení roste i zásobní objem nádrže, ale je pravděpodobnější a častější výskyt poruch v dodávce vody v jednotlivých měsících. Detailnější analýza délky poruch nebyla provedena a pro vhodnost varianty by bylo dobré její provedení.

## 8. POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Česká technická norma ČSN 75 2405 *Vodohospodářské řešení vodních nádrží*, ICS 93.160; 13.060.10, Český normalizační institut, Praha 2004.
- [2] DŘÍMAL, J.; TRUNEC, D.; BRABLEC, A.. *Úvod do metody Monte Carlo*. Brno: MUNI Brno – Fakulta přírodovědecká, 2006, 102 s.
- [3] HAVLÍK, M. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce vodní nádrže Hanušovice*. Brno, 2016, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [4] MARTON, D. *Posudek Technicko–ekonomické studie vodního díla Hanušovice*, Brno 2016, HČ 126 54 035 L.
- [5] MARTON, Daniel. *Vliv nejistot při stanovení členů reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků na vypočtené hodnoty zásobního objemu nádrže: disertační práce*. Brno, 2011, 104 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Školitel prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
- [6] MARTON, D.; STARÝ, M.; MENŠÍK, P.: UNCERESERVOIR; *UNCERESERVOIR - Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software)
- [7] MARTON, D.; STARÝ, M.; PASEKA, S.; MENŠÍK, P. Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat. In XXXV. Přehradní dny 2016 Sborník příspěvků - svazek 1. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. s. 120-127. ISBN: 978-80-01-05969- 2.
- [8] MARTON, D.; STARÝ, M.; MENŠÍK, P. Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, 2015, roč. 63, č. 4, s. 287-294. ISSN: 0042- 790X.
- [9] PALEČAR, R.; VDOLEČEK F.; HALAJ M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot*. Automa, číslo 7-8, ročník 2001, <http://www.odbornecasopisy.cz/>.
- [10] PALSTAT CAQ, *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*, PALSTAV s.r.o, Vrchlabí, 2002.
- [11] PASEKA, S. *Analýza nejistot hydrologických a provozních parametrů na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. Brno, 2015. 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

- [12] Přizpůsobení se změně klimatu: směřování k evropskému akčnímu rámci. *Ministerstvo zemědělství* [online]. 2009. [cit. 2009-09-07]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/file/107064/st08526.cs09.pdf>
- [13] STARÝ, M. *Hydrologie (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005, 213 s.
- [14] STARÝ, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006, 120 s.
- [15] STARÝ, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006, 117 s.
- [16] STARÝ, M. *Vybrané kapitoly z vodního hospodářství krajiny (MODUL 03)*, VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2007
- [17] STARÝ, M. *HYDROG - Software pro simulaci a operativní řízení odtoku vody z povodí*, 1991 – 2017 Brno.
- [18] STARÝ M. *HYDROM, Aplikační software určený k prokládání měrných křivek*, Brno, 1995.
- [19] STARÝ M. 1984: *Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ*, VUT FAST v Brně, Brno, 1984
- [20] Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2015. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena\\_klimatu\\_adaptacni\\_strategie/\\$FILE/OEOK-Adaptacni\\_strategie-20151029.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf)

## 9. Seznam použitých zkratk a symbolů

$BK$	batygrafické čáry zatopených ploch a objemů
$C_{s,x}$	koeficient asymetrie [-]
$C_{v,x}$	koeficient variace [-]
$ČHMÚ$	Český hydrometeorologický ústav
$ČÚZK$	Český úřad zeměměřičský a katastrální
$d$	průměrná měsíční hodnota sytostního doplňku [torr]
$D_x$	disperze (rozptyl)
$E_a$	roční průměrná hodnota výparu z vodní hladiny [mm]
$F_i$	plocha hladiny v určité nadmořské výšce [m <sup>2</sup> ]
$h_{hr}$	výška hráze [m]
$H_i$	nadmořská výška jednotlivé úrovně [m n. m.]
$H_{hr}$	nadmořská výška koruny hráze [m n. m.]
$H_{vh}$	nadmořská výška vodní hladiny [m n. m.]
$H_{v,d}$	úhrn srážek [mm/rok]
$K$	podíl ročního výparu [%]
$M_3(x)$	třetí centrální moment
$O_p$	nalepšený odtok [m <sup>3</sup> /s]
$Q$	průtok vody [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{100}$	stoletý průtok vody [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{1000}$	tisíciletý průtok vody [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{10000}$	desetitisíciletý průtok vody [m <sup>3</sup> /s]
$P_d$	zabezpečení podle dodávky vody [%]

$P_t$	zabezpečení podle trvání [%]
$V_c$	celkový objem nádrže [m <sup>3</sup> ]
$V_m$	objem mrtvého prostoru nádrže [m <sup>3</sup> ]
$V_{sn}$	objem stálého nadržení [m <sup>3</sup> ]
$V_r$	objem retenčního prostoru [m <sup>3</sup> ]
$V_{r+}$	horní mez retenčního objemu [m <sup>3</sup> ]
$V_{r-}$	dolní mez retenčního objemu [m <sup>3</sup> ]
$V_z$	objem zásobního prostoru [m <sup>3</sup> ]
$V_{z+}$	horní mez zásobního objemu [m <sup>3</sup> ]
$V_{z-}$	dolní mez zásobního objemu [m <sup>3</sup> ]
$\Delta_{hr}$	rozdíl výšek hráze vůči deterministickému řešení [m]
$\alpha$	součinitel nalepšení [-]
$\sigma_x$	směrodatná odchylka měřené veličiny
$\mu_x$	střední hodnota měřené veličiny

## 10. Seznam tabulek

Tabulka 1 - N-leté průtoky - Krupá.....	22
Tabulka 2 - Měsíční rozdělení výparu.....	23
Tabulka 3 - Uvažované varianty nejistot na zásobním objemu $V_z$ .....	23
Tabulka 4 - Statistické charakteristiky výpočtu zásobního objemu $V_z$ v UNCE RESERVOIR.....	24
Tabulka 5 – Horní a dolní mez zásobních objemů $V_z$ při $Q_{100}$ .....	25
Tabulka 6 - Závislost $O_p$ na $V_z$ - při max $V_z$ .....	27
Tabulka 7 - Závislost $O_p$ na $V_z$ - při min $V_z$ .....	28
Tabulka 8 - Statistické charakteristiky výpočtu zabezpečení podle trvání $P_t$ v UNCE RESERVOIR.....	29
Tabulka 9 - Statistické charakteristiky výpočtu zabezpečení podle dodávky vody $P_d$ v UNCE RESERVOIR.....	30
Tabulka 10 - Závislost $P_t$ a $P_d$ na $O_p$ – při max $V_z$ .....	31
Tabulka 11 - Závislost $P_t$ a $P_d$ na $O_p$ - při min $V_z$ .....	33
Tabulka 12 - Deterministické řešení objemů nádrže a výšky hladiny.....	39
Tabulka 13 – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při $Q_{100}$ v HYDROG.....	43
Tabulka 14 – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při $Q_{100}$ v HYDROG.....	45
Tabulka 15 – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při $Q_{1000}$ v HYDROG.....	46
Tabulka 16 – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při $Q_{1000}$ v HYDROG.....	47
Tabulka 17 – Maximální hodnoty celkového objemu nádrže při $Q_{10000}$ v HYDROG.....	48
Tabulka 18 – Maximální hodnoty objemu retenčního prostoru při $Q_{10000}$ v HYDROG.....	49
Tabulka 19 - Statistické charakteristiky celkového objemu nádrže - HYDROG.....	50
Tabulka 20 - Statistické charakteristiky objemu retenčního prostoru - HYDROG.....	50
Tabulka 21 – Maximální celkové objemy nádrže pro Data 1.....	51
Tabulka 22 – Minimální celkové objemy nádrže pro Data 1.....	51
Tabulka 23 - Maximální celkové objemy nádrže pro Data 2.....	52
Tabulka 24 - Minimální celkové objemy nádrže pro Data 2.....	53
Tabulka 25 – Varianty maximálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 1.....	54
Tabulka 26 - Varianty minimálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 1.....	54
Tabulka 27 - Varianty maximálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 2.....	55

Tabulka 28 - Varianty minimálních celkových objemů nádrže zatížených nejistotami pro Data 2.....	55
Tabulka 29 - Kategorie zařazení vodní nádrže dle významnosti .....	58
Tabulka 30 - Konečné shrnutí výsledků variant nádrží pro kontrolní povodeň $Q_{10000}$ .....	63

## 11. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Případy standardní a rozšířené nejistoty pro normální rozdělení pravděpodobnosti ....	7
Obrázek 2 - Střední hodnota s x-ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti .....	9
Obrázek 3 - Procentuální rozdělení pravděpodobnosti náhodného výběru prvku (zdroj: <a href="https://matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni">https://matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni</a> ) .....	9
Obrázek 4 - Vliv koeficientu asymetrie.....	10
Obrázek 5 - Schéma generování náhodných průtokových řad průměrných hodinových průtoků metodou Monte Carlo .....	14
Obrázek 6 - Geografická poloha v ČR (zdroj: <a href="http://www.mapy.cz">www.mapy.cz</a> ).....	19
Obrázek 7 - Varianty umístění profilu nádrže .....	20
Obrázek 8 - Morfologie varianty B (zdroj: <a href="http://www.google.cz/maps">www.google.cz/maps</a> ) .....	21
Obrázek 9 - Zjednodušené schéma prostorů vodní nádrže varianty B).....	21
Obrázek 10 - Návrhový povodňový hydrogram - Habartice .....	22
Obrázek 11 – Hydrogram povodně při $Q_{100}$ .....	35
Obrázek 12 - Hydrogram povodně při $Q_{1000}$ .....	36
Obrázek 13 – Hydrogram povodně při $Q_{10000}$ .....	37
Obrázek 14 - Vodní hladina povodně při $Q_{100}$ .....	37
Obrázek 15 - Vodní hladina povodně při $Q_{1000}$ .....	38
Obrázek 16 - Vodní hladina povodně při $Q_{10000}$ .....	38
Obrázek 17 - Vodohospodářské schéma nádrže při $Q_{10000}$ - deterministické řešení .....	61
Obrázek 18 - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při $Q_{10000}$ - min .....	61
Obrázek 19 - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při $Q_{10000}$ – max.....	62
Obrázek 20 - Vodohospodářské schéma vodní nádrže při $Q_{10000}$ - návrh .....	62



## 12. Seznam grafů

Graf 1 - Závislost $O_p$ na $V_z$ při max $V_z$ .....	28
Graf 2 - Závislost $O_p$ na $V_z$ při min $V_z$ .....	29
Graf 3 - Závislost $O_p$ na $P_t$ při max $V_z$ .....	32
Graf 4 - Závislost $O_p$ na $P_d$ při max $V_z$ .....	32
Graf 5 - Závislost $O_p$ na $P_t$ při min $V_z$ .....	33
Graf 6 - Závislost $O_p$ na $P_d$ při min $V_z$ .....	34
Graf 7 - Průběh průtokové řady $Q_{100}$ - Data 1 .....	40
Graf 8 - Průběh průtokové řady $Q_{1000}$ - Data 1 .....	40
Graf 9 - Průběh průtokové řady $Q_{10000}$ - Data 1 .....	41
Graf 10 - Průběh průtokové řady $Q_{100}$ - Data 2 .....	41
Graf 11 - Průběh průtokové řady $Q_{1000}$ - Data 2 .....	42
Graf 12 - Průběh průtokové řady $Q_{10000}$ - Data 2 .....	42