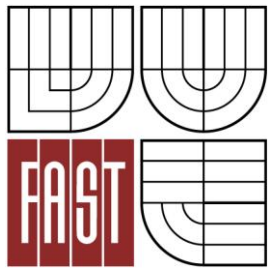




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

# SIMULAČNÍ A OPTIMALIZAČNÍ MODEL SOUSTAVY NÁDRŽÍ V POVODÍ ŘEKY SVITAVY

SIMULATION AND OPTIMIZATION MODEL OF RESERVOIR SYSTEM IN SVITAVA RIVER BASIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL ŠEJNOHA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PAVEL MENŠÍK, Ph.D.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Michal Šejnoha
<b>Název</b>	Simulační a optimalizační model soustavy nádrží v povodí řeky Svitavy
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2013
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	30. 5. 2014
V Brně dne 30. 11. 2013	

.....  
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.  
Vedoucí ústavu

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

## **Podklady a literatura**

1. Menšík, P.; Starý, M. SOMVS - Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy. (software)
2. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01). Brno: VUT, 2006. 120 s.
3. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02). Brno: VUT, 2006. 117 s.
4. Starý, M.; Šálek, J.; Kožnárek, Z.; Šoustal, O. Automatizované systémy řízení ve vodním hospodářství. Metodické návody do cvičení a diplomového semináře. 1. vyd. Brno: VUT, 1987. 126 s.
5. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Metodické návody do cvičení. 1. vyd. Brno: VUT, 1987. 67 s.
6. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. 1. vyd. Brno: VUT, 1986. 165 s.

## **Zásady pro vypracování**

Úkolem bakalářské práce bude s použitím programu SOMVS vytvořit simulační a optimalizační model vybrané soustavy nádrží. Programem sestavený simulační model bude možno použít k řešení úloh optimálního rozvoje systému zásobení vodou. Programem sestavený optimalizační model bude možno použít k řešení úlohy optimálního řízení systému zásobení vodou. Funkčnost obou modelů bude vhodně ověřena.

## **Předepsané přílohy**

.....

Ing. Pavel Menšík, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na sestavení simulačního a optimalizačního modelu vybrané vodohospodářské soustavy. Oba modely jsou vytvořeny v programu SOMVS. V simulačním modelu jsou na základě volby nalepšených odtoků z nádrží hledány hranice tříd zabezpečení. Simulační model simuluje tok vody systémem. Není hledáno optimální řešení pomocí optimalizačních metod. V optimalizačním modelu je použita optimalizační metoda diferenciální evoluce. Optimalizační model hledá maximalizované hodnoty kritériální funkce pro odběr vody z vybraného profilu.

## Klíčová slova

Nádrž, simulační model, optimalizační model, vodohospodářská soustava, zásobní funkce

## Abstract

The bachelor's thesis is focused on the construction of a simulation and optimization model selected water management system. Both models are created with program SOMVS. The simulation model is based on the choice improved outflow from reservoir searching of boundaries Assurance classes. The simulation model simulates the flow of water through the system. Not finding the optimal solution using optimization methods. In the optimization model is used optimization method of differential evolution. The optimization model seeks maximized value of the objective function for water withdrawal from selected profile.

## Keywords

Reservoir, simulation model, optimization model, water management system, storage fiction

### **Bibliografická citace VŠKP**

Michal Šejnoha *Simulační a optimalizační model soustavy nádrží v povodí řeky Svitavy*. Brno, 2014. 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 26.5.2014

.....  
podpis autora

Michal Šejnoha

#### Poděkování:

Úvodem bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Menšíkovi, Ph.D., za trpělivost, vstřícnost, cenné rady a odborné vedení během psaní mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům, kteří mi umožnili studium a po celou dobu mě podporovali. Chtěl bych také poděkovat své přítelkyni, která mi byla velkou oporou při studiu. I v nejtěžších situacích při mně stála a snažila se mi ukázat ten správný směr.

# Obsah

1. Úvod .....	1
1.1 Nádrže .....	2
1.1.1 Letovice .....	2
1.1.2 Boskovice.....	4
2. Cíl práce .....	7
3. Matematický model zásobní funkce vodohospodářské soustavy.....	8
3.1 Definice systému .....	8
3.2 Formulace úlohy optimálního řízení.....	10
3.3 Formulace úlohy optimálního rozvoje.....	12
3.4 Metody řešení .....	13
3.5 Zjednodušený výpočet ztrát vody z nádrží.....	14
3.6 Účinek vlivu mezipovodí.....	18
3.7 Zabezpečení.....	18
3.8 Program SOMVS .....	20
4. Praktická aplikace .....	22
4.1 Výběr časově synchronní průtokové řady.....	22
4.2 Schematizace vybraného subsystému nádrží.....	24
4.3 Omezující rovnice řešeného subsystému nádrží.....	26
4.4 Parametry schematizované soustavy nádrží .....	27
4.5 Vliv mezipovodí .....	30
4.6 Simulační model .....	31
4.7 Optimalizační model.....	33
4.8 Zpracování výstupů z programu .....	35
4.8.1 Výstupy simulačního modelu .....	35
4.8.2 Výstupy optimalizačního modelu .....	43
5. Shrnutí výsledků .....	46
5.1 Simulační model .....	46
5.2 Optimalizační model.....	49
6. Závěr .....	50
Seznam použitých zdrojů.....	51
Seznam obrázků a tabulek.....	52



# 1. Úvod

V 21. století se čím dál více setkáváme s pojmem globální oteplování, kterým je nazýváno zvyšování průměrné teploty klimatického systému Země. Tento jev má mnoho přírodních úkazů - zvyšování hladiny moře, tání ledovců, snižování průměrných úhrnů srážek, snížení vodní hladiny v řekách. Pokud připojíme ke globálnímu oteplování také potřebu vody pro hospodářství a průmysl, je nutné hledat všechny možnosti, jak nejlépe naložit s dostupnými vodními zásobami. K tomu poslouží především velké vodní nádrže.

Velké vodní nádrže se řídí pomocí manipulačních řádů. Podkladem pro ně je dispečerský graf dané nádrže. Ten vychází z přítoků do nádrže v minulosti. Pokud je více spolupracujících nádrží v jedné vodohospodářské soustavě, je velmi obtížné řídit odtok pomocí dispečerských grafů. Z tohoto důvodu je nutné, aby byl odtok z nádrží vodohospodářské soustavy řízen automatizovanými systémy. Pouze tímto způsobem je možné docílit optimálního řízení odtoku z izolované nádrže nebo i z nádrží spolupracujících v rámci vodohospodářské soustavy.

V práci jsou vytvořeny dva modely – simulační a optimalizační. Simulační model lze například použít k ověření vhodnosti nově navržených pravidel před vlastním zavedením pravidel do reálného provozu. Dále je možno simulační model použít v případě, že stávající struktura systému přestane být dostačující a hledá se její nová podoba.

Optimalizační model je používán převážně k řešení úloh optimálního řízení. To znamená v případech, ve kterých hledáme optimální tok vody systémem s definovanou strukturou, například pro řízení systému při existenci předpovědí přítoku vody do systému.

Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy je vytvořen pro nádrže ležící v povodí řeky Svitavy – viz obr. 1. Vodohospodářská soustava je tvořena vodní nádrží Letovice a vodárenskou nádrží Boskovice.



**Obr. 1** Povodí řeky Svitavy

## **1.1 Nádrže**

Pro seznámení s významnými údaji o řešené soustavě jsou zde uvedeny základní informace o každém vodním díle a jeho nejbližším okolí. Informace jsou převzaty z internetových stránek Povodí Moravy s. p. a z poskytnutých manipulačních řádů k řešeným nádržím. Ty byly poskytnuty na základě žádosti jako podklad pro bakalářskou práci Povodím Moravy s. p..

### **1.1.1 Letovice**

Vodní nádrž Letovice leží na pravém přítoku řeky Svitavy nedaleko města Letovice viz obr. 2. Nádrž leží na 2,923 km toku Křetínky. Stavba přehrady započala roku 1972 a do provozu byla uvedena roku 1976. Hlavním důvodem výstavby bylo zmírnění dopadu velkého odběru podzemní vody pro Brno na průtokový režim v řece Svitavě, zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod přehradou, Energetické využití odtoků z nádrže v malé vodní elektrárně na přehradě, rekreace, chov ryb pro sportovní rybářství, snížení povodňových průtoků neovladatelným retenčním

prostorem. Hráz je zemní sypaná se středním jílovým těsněním. Výška hráze je 28,5 m a je dlouhá 126,0 m, šířka koruny je 5,0 m. Maximální kapacita spodních výpustí je  $7,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Minimální zůstatkový průtok pod přehradou je stanoven na  $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Kompenzační nalepšení průtoku pod soutokem řeky Svitavy a říčky Křetínky na  $0,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Údaje o jednotlivých prostorech v nádrži jsou popsány v tab. 1 až tab. 4.



**Obr. 2** Přehrada Letovice

**Tab. 1** VD Letovice – prostor stálého nadržení

Základní údaje - prostor stálého nadržení nádrže:	
Kóta dna nádrže	333,80 m n. m.
Kóta hladiny stálého nadržení $H_s$	346,90 m n. m.
Objem prostoru stálého nadržení	1,560 mil. $\text{m}^3$
Zatopená plocha při hl. stálého nadržení	37,5 ha

**Tab. 2** VD Letovice – zásobní prostor

Základní údaje - zásobní prostor nádrže:	
Kóta min. hladiny zásobního prostoru	346,90 m n. m.
Kóta max. hladiny zásobního prostoru $H_z$	360,10 m n. m.
Objem zásobního prostoru	9,015 mil. $\text{m}^3$
Zatopená plocha při max. zásobní hladině	104,6 ha

**Tab. 3** VD Letovice – retenční neovladatelný prostor

Základní údaje - retenční neovladatelný prostor nádrže:	
Kóta min. hl. neovl. retenčního prostoru	360,10 m n. m.
Kóta max. hladiny ret. prostoru $H_{\max}$	361,10 m n. m.
Objem neovl. retenčního prostoru	1,068 mil. m <sup>3</sup>
Zatopená plocha při max. hladině	110,9 ha

**Tab. 4** VD Letovice – celkový prostor

Základní údaje - celkový prostor nádrže:	
Maximální hladina	361,10 m n. m.
Celkový objem nádrže	11,644 mil. m <sup>3</sup>
Celková zatopená plocha	110,9 ha

### 1.1.2 Boskovice

Vodárenská nádrž Boskovice leží na toku Bělá – viz obr. 3. Nachází se východně od města Boskovice. Leží na 7,4 km toku Bělá. Hlavním důvodem výstavby přehrady byly rostoucí požadavky na pitnou vodu v oblasti celého Blanenska a Boskovicka. Výstavba proběhla v období 1985 – 1990. Účelem přehrady je akumulace vody pro zajištění odběru pitné vody, snížení kulminačních průtoků povodňových vln, energetické využití vodního potenciálu v malé vodní elektrárně na přehradě a úprava průtoků pod přehradou. Hráz přehrady je sypaná, kamenitá se středním hlinitým těsněním. Hráz je vysoká 42,5 m a je dlouhá 305,0 m. Koruna je široká 11,0 m. Maximální kapacita spodních výpustí je 8,00 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Minimální zůstatkový průtok pod přehradou je stanoven na 0,034 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Údaje o jednotlivých prostorech v nádrži jsou popsány v tab. 5 až tab. 8.



**Obr. 3** Přehrada Boskovic

**Tab. 5** VD Boskovic – prostor stálého nadržení

Základní údaje - prostor stálého nadržení nádrže:	
Kóta dna nádrže	394,00 m n. m.
Kóta hladiny stálého nadržení $H_s$	407,00 m n. m.
Objem prostoru stálého nadržení	0,425 mil. m <sup>3</sup>
Zatopená plocha při hl. stálého nadržení	9,4 ha

**Tab. 6** VD Boskovic – zásobní prostor

Základní údaje - zásobní prostor nádrže:	
Kóta min. hladiny zásobního prostoru	407,00 m n. m.
Kóta max. hladiny zásobního prostoru $H_z$	430,00 m n. m.
Objem zásobního prostoru	6,152 mil. m <sup>3</sup>
Zatopená plocha při max. zásobní hladině	52,2 ha

**Tab. 7** VD Boskovice – retenční neovladatelný prostor

Základní údaje - retenční neovladatelný prostor nádrže:	
Kóta min. hl. neovl. retenčního prostoru	430,00 m n. m.
Kóta max. hladiny ret. prostoru Hmax	430,80 m n. m.
Objem neovl. retenčního prostoru	0,443 mil. m <sup>3</sup>
Zatopená plocha při max. hladině	53,3 ha

**Tab. 8** VD Boskovice – celkový prostor

Základní údaje - celkový prostor nádrže:	
Maximální hladina	430,80 m n. m.
Celkový objem nádrže	7,020 mil. m <sup>3</sup>
Celková zatopená plocha	53,3 ha

## **2. Cíl práce**

Úkolem bakalářské práce je vytvořit simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy nádrží Letovice a Boskovice. Oba modely jsou automatizovaně vytvořeny programem SOMVS (Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy). Před vlastním sestavením modelů jsou zjištěny požadované podklady. Na základě podkladů jsou v programu SOMVS sestaveny oba modely a následně je ověřena jejich funkčnost. Funkčnost modelů je ověřena v reálné průtokové řadě průměrných měsíčních průtoků. Vytvořené modely bude možno v budoucnu využít k řešení problémů spjatých s nedostatkem vody.

### 3. Matematický model zásobní funkce vodohospodářské soustavy

Vodohospodářská soustava je definována jako množina vodohospodářských prvků. Tyto prvky jsou spojeny vzájemnými vazbami v účelový celek. Při definici vodohospodářské soustavy, systémem zásobení vodou, je z vodohospodářské soustavy vyjmuta pouze ta množina prvků a vazeb, která má přímý vliv na funkci zásobení vodou. Množina vyjmutých prvků a vazeb je schematizována pomocí grafu v podkapitole 3.1. Na schematizovaném grafu vybraných množin prvků je možné řešit dva základní typy úloh. Prvním je úloha optimálního řízení. Je popsána v podkapitole 3.2 a lze ji použít při pevně definované podobě grafu. Pro nalezení optimálního řešení je možné použít přímou optimalizační metodu nebo simulační model. Rozdílem obou přístupů je způsob řešení. Druhou je úloha optimálního rozvoje. Ta je popsána v podkapitole 3.3. Je využita v případě, kdy definovaný ohodnocený graf přestane být dostačující a hledá se jeho nová podoba. Metody řešení formulovaných úloh jsou popsány podkapitole 3.4. Do vodohospodářského řešení zásobní funkce jsou zavedeny ztráty vody z nádrží, účinek vlivu mezipovodí a také vodárenský odběr z nádrže Boskovice. Ztráty vody z nádrží jsou popsány v podkapitole 3.5. Účinek vlivu mezipovodí je popsán v podkapitole 3.6. V podkapitole 3.7 je popsána problematika zabezpečení. V podkapitole 3.8 je popsán program SOMVS. (Menšík, 2012).

#### 3.1 Definice systému

Systém zásobení vodou je možné definovat jako konstrukci ohodnoceného grafu  $G(N, H)$  (Starý, 1986), tvořeného množinou vrcholů  $N (n_i \in N)$  a množinou hran grafu  $H (h_{i,j} \in H)$ . Množinu vrcholů  $N$  lze rozdělit na podmnožiny:

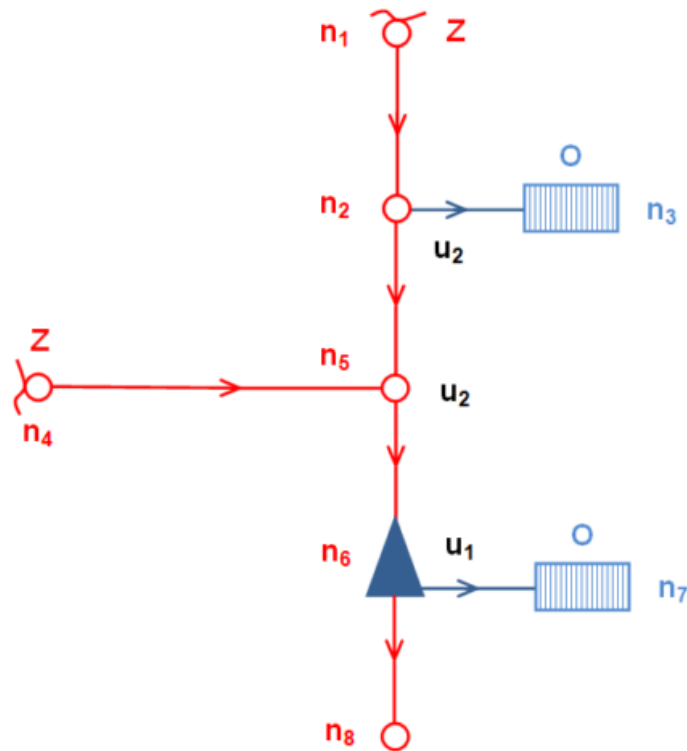
- vodní zdroje  $Z$ , ty jsou tvořeny vrcholy  $z \in Z$ ,
- mezilehlé uzly řízení  $U$ , ty jsou tvořeny vrcholy  $u \in U$  (tato množina je tvořena dvěma podmnožinami:
  - $U1$  (nádrže), které mají schopnost regulovat průtok vody v toku v čase pomocí svého objemu
  - $U2$  (uzly rozdělující průtok), mají schopnost pouze spojovat nebo rozdělovat toky
- odběratelé  $O$ , ty jsou tvořeny vrcholy  $o \in O$

Obecně je tedy možné zařadit jednotlivé vrcholy:  $n_i \in Z, n_i \in U, n_i \in O$ .

Hrany grafu  $h_{i,j}$  (nebo  $n_i, n_j$ ), které vycházejí z  $i$ -tého vrcholu a končí v  $j$ -tém vrcholu, tvoří množinu  $H (h_{i,j} \in H)$ . Hrany grafu tvoří koryta řek. Graf  $G(N, H)$  je jednoznačně zadán určením množiny  $N$  a  $H$ . Množinu  $N$  je možno psát ve tvaru:

$$N = Z + U + O. \quad (1)$$





**Obr. 4** Orientovaný graf, převzato (Menšík, 2012).

očíslování vrcholů:

$$n_1, n_4 \in Z,$$

$$n_6 \in U1,$$

$$n_2, n_5 \in U2,$$

$$n_3, n_7, n_8 \in O.$$

Orientace hran grafu (dána podle směru toku vody systémem):

$$h_{1,2}, h_{2,3}, h_{2,5}, h_{4,5}, h_{5,6}, h_{6,7}, h_{6,8} \in H$$

Průtok vody hranou grafu je obecně definován jako  $Q_{ij}(x, t)$ . Za předpokladu, že doba dotoku (doba, za kterou voda proteče celý systém) je výrazně kratší než je časový krok  $\Delta t$ , je možné zanedbat přechodové jevy ve hranách grafu. Při platnosti výše uvedeného předpokladu je průtok na začátku hrany grafu stejný jako průtok na konci hrany grafu. Délka časového kroku při strategickém řízení odtoku je jeden měsíc, ale může být delší i kratší. Při délce kroku jeden měsíc jsou spojitě průtoky  $Q_{ij}(t)$  na řešeném období nahrazeny vektorem  $\underline{Q}_{i,j}^\tau = (Q_{i,j}^1, Q_{i,j}^2, \dots, Q_{i,j}^N)$ . Prvky vektoru jsou průměrné měsíční průtoky a jejich pořadí určují horní index  $\tau = 1, 2, \dots, N$ , kde  $N$  je počet řešených časových kroků (měsíců) (Menšík, 2012).

### 3.2 Formulace úlohy optimálního řízení

Úlohu je možno formulovat jako nalezení množiny vektorů:

$$\underline{Q}_{z,j}^{\tau} = (Q_{z,j}^1, Q_{z,j}^2, \dots, Q_{z,j}^N), \quad \forall z \in Z; n_j \in U, \quad (2)$$

$$\underline{Q}_{i,j}^{\tau} = (Q_{i,j}^1, Q_{i,j}^2, \dots, Q_{i,j}^N), \quad \forall n_i \in U; n_j \in U, \quad (3)$$

$$\underline{Q}_{i,o}^{\tau} = (Q_{i,o}^1, Q_{i,o}^2, \dots, Q_{i,o}^N), \quad \forall o \in O; n_i \in U, \quad (4)$$

$$\underline{V}_i^{\tau} = (V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^N), \quad \forall n_i \in U1, \quad (5)$$

kteřé popisují tok vody orientovaným ohodnoceným grafem. Seřazením všech prvků množiny vektorů (2) až (5) získáme vektor neznámých  $\underline{X}$ , který obsahuje všechny neznámé veličiny řešeného subsystému na danou úlohu. Prvky vektoru  $\underline{X}$  musí vyhovovat omezujícím podmínkám typu rovnice:

- pro vrcholy vodních zdrojů:

$$\sum_{h_{z,j} \in C(z)} Q_{z,j}^{\tau} = Q_z^{\tau}, \quad \forall z \in Z, \quad (6)$$

- pro tok vrcholy grafu s akumulací, které popisuje základní rovnice nádrže upravená do tvaru:

$$\sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{i,j}^{\tau} - \sum_{h_{j,k} \in B(j)} Q_{j,k}^{\tau} - Z_j(V_j^{\tau}) + \sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{PO_{i,j}}^{\tau} = \frac{V_j^{\tau} - V_j^{\tau-1}}{\Delta t}, \quad \forall n_j \in U1, \quad (7)$$

- pro tok vrcholy grafu bez akumulace:

$$\sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{i,j}^{\tau} - \sum_{h_{j,k} \in B(j)} Q_{j,k}^{\tau} + \sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{PO_{i,j}}^{\tau} = 0, \quad \forall n_j \in U2, \quad (8)$$

kde značí:

$Z_j(V_j^{\tau})$  ztrátový průtok z vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\Delta t$  délka časového kroku,

$V_j^{\tau}$  objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{i,j}^{\tau}$  průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{j,k}^{\tau}$  průtok hranou  $h_{j,k}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{PO_{i,j}}^\tau$  podzemní přítok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$A(j)$  množina všech hran  $h_{i,j}$ , které předávají vodu  $n_j$ ,

$B(j)$  množina všech hran  $h_{j,k}$ , kterými odtéká voda z vrcholu  $n_j$ ,

$C(z)$  množina všech hran  $h_{z,j}$ , kterými přitéká voda z vrcholu  $n_z$  do systému,

$Q_z^\tau$  hodnota přítoku do vrcholu  $z$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{z,j}^\tau$  průtok hranou  $h_{z,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

a omezujícím podmínkám typu nerovnosti, které plynou z ohodnocení grafu  $G(N, H)$ :

- pro průtok hranami:

$$\hat{Q}_{i,j}^\tau \leq Q_{i,j}^\tau \leq \check{Q}_{i,j}^\tau, \quad \forall n_i \in U; n_j \in U; \forall n_i \in Z, \quad (9)$$

- pro odběry:

$$\hat{Q}_o^\tau \leq Q_{i,o}^\tau \leq \check{Q}_o^\tau, \quad \forall o \in O; \forall n_i \in U, \quad (10)$$

- pro plnění nádrží:

$$\hat{V}_j^\tau \leq V_j^\tau \leq \check{V}_j^\tau, \quad \forall n_i \in U1, \quad (11)$$

kde značí:

$\check{Q}_{i,j}^\tau$  maximální průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\hat{Q}_{i,j}^\tau$  minimální průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\check{Q}_o^\tau$  maximální odběr ve vrcholu  $n_o$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{i,o}^\tau$  odběr hranou  $h_{i,o}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\hat{Q}_o^\tau$  minimální odběr ve vrcholu  $n_o$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\check{V}_j^\tau$  maximální objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\hat{V}_j^\tau$  minimální objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\hat{\cdot}, \check{\cdot}$  horní a dolní mez příslušného intervalu možného výskytu.

Aby měla úloha řešení, je nutné zadat počáteční a okrajové podmínky Počáteční podmínka (12) určuje počáteční plnění nádrže v časovém kroku  $\tau = 0$ .

$$V_j^o, \quad \forall n_j \in U1. \quad (12)$$

Okrajovými podmínkami rozumíme průtokové řady ve vstupních profilech systému a jsou přiřazeny pravé straně rovnice (6). Prvky vektoru  $\underline{X}$  určují polohu bodu (hodnota vektoru  $\underline{X}$ ) ve vícerozměrném prostoru. Řešení rovnic (6), (7) a (8), při dodržení nerovností (9), (10), (11) má nekonečně mnoho řešení. Pomocí definované kriteriální funkce  $\pi$ , která je funkcí hodnoty vektoru  $\underline{X}$ , se stanoví jednoznačné řešení. Je vhodné vyjádřit funkci v aditivním tvaru například obecně:

$$\left[ \pi = \sum_{\forall o \in O} \sum_{\tau=1}^N f_o(Q_{i,o}^\tau) \right] \rightarrow MAX(MIN), \quad (13)$$

kde značí:

$Q_{i,o}^\tau$  průměrné odebrání množství vody v časovém kroku  $\tau$ ,

$f_o(Q_{i,o}^\tau)$  dílčí kriteriální funkci přiřazenou odběrateli vody  $o$ .

### 3.3 Formulace úlohy optimálního rozvoje

Formulace úlohy optimálního rozvoje je téměř shodná s formulací úlohy optimálního řízení. Samotné řešení vede většinou na variantní řešení. V každé variantě, řešení úlohy optimálního rozvoje, se kromě optimálního toku vody grafem  $G(N, H)$  také hledá současně i jedno nebo více neznámých ohodnocení grafu (například zásobní objem nové nádrže). Vektor neznámých  $\underline{X}$  je oproti předchozí úloze rozšířen o příslušná neznámá ohodnocení. Neznámí ohodnocení jsou hledána na intervalech přípustných hodnot, jejichž meze jsou označeny horním indexem MIN a MAX. Například pro neznámé ohodnocení z (11) platí:

$$V_j^{MIN} \leq \check{V}_j^\tau \leq V_j^{MAX}, \quad \forall n_j \in NU1, \quad (14)$$

kde značí:

$NU1$ , množinu nově navrhovaných uzlů řízení s akumulací,

$V_j^{MAX}$  maximálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu  $n_j$ ,

$V_j^{MIN}$  minimálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu  $n_j$ .

Obdobně by bylo možno vymežit i další intervaly přípustných hodnot pro další neznámá ohodnocení z (9) a (10).

Kriteriální funkce se velmi často vyjadřuje pomocí technicko–ekonomických ukazatelů, které například vyjadřují závislost jednorázových investičních nákladů na doplnění systému přepočítaných na řešené období doplněných o náklady na provoz, údržbu systému během řešeného období a hodnotu neznámého ohodnocení grafu. Jednoduše je také možno kriteriální funkci vyjádřit pomocí hydrologické zabezpečení dodávky vody odběratelům vody a hydrologické zabezpečení ve vybraných vnitřních hranách grafu.

### **3.4 Metody řešení**

Matematický model úloh optimálního řízení a optimálního rozvoje představuje optimalizační problém, ve kterém jsou omezující podmínky lineární a kriteriální funkce nelineární. K řešení úloh je možné použít přímé optimalizační metody (dále optimalizační model) nebo simulační model. Rozdíl mezi oběma modely je ve způsobu řešení.

#### **Simulační model**

Omezující podmínky typu rovnice jsou řešeny postupně po časových krocích  $\tau = 1, 2, \dots, N$ , jelikož jsou zadána pravidla řízení odtoku vody z nádrží. Vektor neznámých  $\underline{X}$  je tedy vyčíslován postupně pro jednotlivé časové kroky  $\tau$  pomocí rovnic (6), (7) a (8). Optimálního nalezení neznámých ohodnocení grafu je dosaženo opakovaným řešením řady variant. Varianty se od sebe odlišují změnou jednoho nebo více parametrů.

#### **Optimalizační model**

U optimalizačního modelu je zvolena počáteční hodnota vektoru  $\underline{X}$  (násada). Hodnota vektoru  $\underline{X}$  je postupně upřesňována tak, aby byly splněny všechny omezující podmínky a kriteriální funkce dosáhla požadovaného extrému. Způsob upřesňování, vektoru neznámých, závisí na zvolené metodě optimalizace. Pořadí plnění omezujících podmínek z hlediska pořadí časových kroků není rozhodující. Omezující podmínky, typu rovnice a nerovnice, jsou řešeny souhrnně jako celek. Uvedené řešení nevyžaduje zadání způsobu řízení systému (nejčastěji odtoky vody z nádrží). V práci je pro nalezení hodnoty vektoru  $\underline{X}$  použita metoda diferenciální evoluce.

#### **Diferenciální evoluce (DE)**

Diferenciální evoluce je stochastická optimalizační metoda a její algoritmus je evolučního typu. Hlavní rozdíl diferenciální evoluce od většiny ostatních genetických algoritmů je v tom, že tvorba potomků se provádí pomocí čtyř rodičů a ne pouze pomocí dvou. Cílem diferenciální evoluce je v cyklech zvaných „generace“ vyšlechtit co nejlepší populaci (množinu) jedinců ve smyslu hodnot kriteriální funkce (Zelinka, 2002). Během každého optimalizačního procesu se provádí následující kroky:

#### 1) Stanovení parametrů

Vybrané hodnoty parametrů určují chod celé evoluce. Jsou to parametry  $F$  – mutační konstanta v intervalu  $\langle 0,2 \rangle$ ,  $CR$  – práh křížení v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ ,  $NP$  – počet jedinců v populaci (velikost množiny jedinců),  $D$  – rozměr vektoru jedince (počet hledaných parametrů).

#### 2) Tvorba populace

Populace se tvoří vygenerováním množiny jedinců. Parametry každého jedince jsou stanovené pseudonáhodně a to tak, aby vyhovovaly omezujícím podmínkám typu nerovnosti.

#### 3) Započetí cyklu generace

Během každé generace se provádí ještě cyklus, který zabezpečuje postupně evoluční šlechtění každého jedince z populace. V tomto cyklu se postupně vybírá jeden jedinec (aktivní jedinec, cílový vektor) za druhým, z nichž je proveden následující evoluční cyklus.

#### 4) Evoluční cyklus

V tomto cyklu je prováděna mutace a křížení. Náhodně se zvolí tři další různé vektory (jedinci) z populace. První dva se od sebe odečtou a získá se tak diferenční vektor. Ten se vynásobí mutační konstantou, která jej změní (zmutuje), a získá váhovaný diferenční vektor. Váhovaný diferenční vektor se přičte k třetímu náhodně vybranému vektoru a získá se šumový vektor. Následně se připraví zkušební vektor a z cílového a šumového vektoru se bere postupně jeden prvek za druhým. Pro každou vybranou dvojici se generuje pseudonáhodně číslo v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$  a porovná se s prahem křížení. Pokud je toto číslo menší než práh křížení, pak se do příslušné pozice ve zkušebním vektoru umístí prvek z vektoru šumového a v opačném případě z vektoru cílového. Tak se získá zkušební vektor, jehož hodnota kriteriální funkce se porovná s hodnotou kriteriální funkce cílového vektoru. Na pozici cílového vektoru v nové populaci je vybrán ten vektor – jedinec, který má hodnotu kriteriální funkce lepší. Tím je zajištěno, že se do nové generace dostanou jedinci s lepšími vlastnostmi. Vybere se další jedinec – cílový vektor a celý evoluční cyklus se opakuje až do vyčerpání populace. Tak vznikne nová generace potomků (jedinců).

#### 5) Testování naplnění ukončovacích parametrů

Diferenciální evoluce je ukončena po provedení požadovaného počtu generací. Jiný ukončovací parametr tento algoritmus nemá.

### 3.5 Zjednodušený výpočet ztrát vody z nádrží

Nedílnou součástí vodohospodářského řešení zásobní funkce jsou i ztráty vody z nádrže. Mohou totiž nemalou měrou ovlivnit požadovaný odtok z nádrže a tím i funkci nádrže, na kterou je navrhována.

V rovnici (15) jsou uvedeny celkové ztráty vody z nádrže členem  $Z_j(V_j^t)$ . Ztráty vody z nádrže závisí především na výšce hladiny vody, která je funkcí okamžitého plnění nádrže  $V_j^t$ . Celková ztráta vody z nádrže se skládá ze tří typů ztrát a to: ztráta vody výparem z volné vodní hladiny  $Z_j^V$ , ztráta vody průsakem  $Z_j^P$  a to buď tělesem hráze, nebo průsak dnem. Třetím a posledním typem jsou ztráty vody způsobené netěsnostmi uzávěrů  $Z_j^{NU}$  (Starý, 1986).

$$Z_j(V_j^t) = Z_j^V + Z_j^P + Z_j^{NU} \quad (15)$$

V práci je uvažováno v rámci simulačního modelu se zjednodušeným výpočtem ztrát vody z nádrží. Název sám o sobě vypovídá o jednodušší možnosti zavedení ztrát do výpočtu. V programu je možné zavedení ztráty vody z nádrží i podrobným výpočtem. Ten však nebyl v práci řešen. V případě nedostatku informací k řešeným nádržím je výhodné použít zjednodušený výpočet ztrát vody z nádrží. Výhodou zjednodušeného výpočtu ztrát je jeho nenáročnost zavedení do výpočtu v programu SOMVS. Na začátek je stanoveno střední plnění zásobního objemu jednotlivých nádrží ve vrcholu  $n_j$ :

$$V_{j,z} = 0,66 * V_{j,z} \quad (16)$$

kde značí:

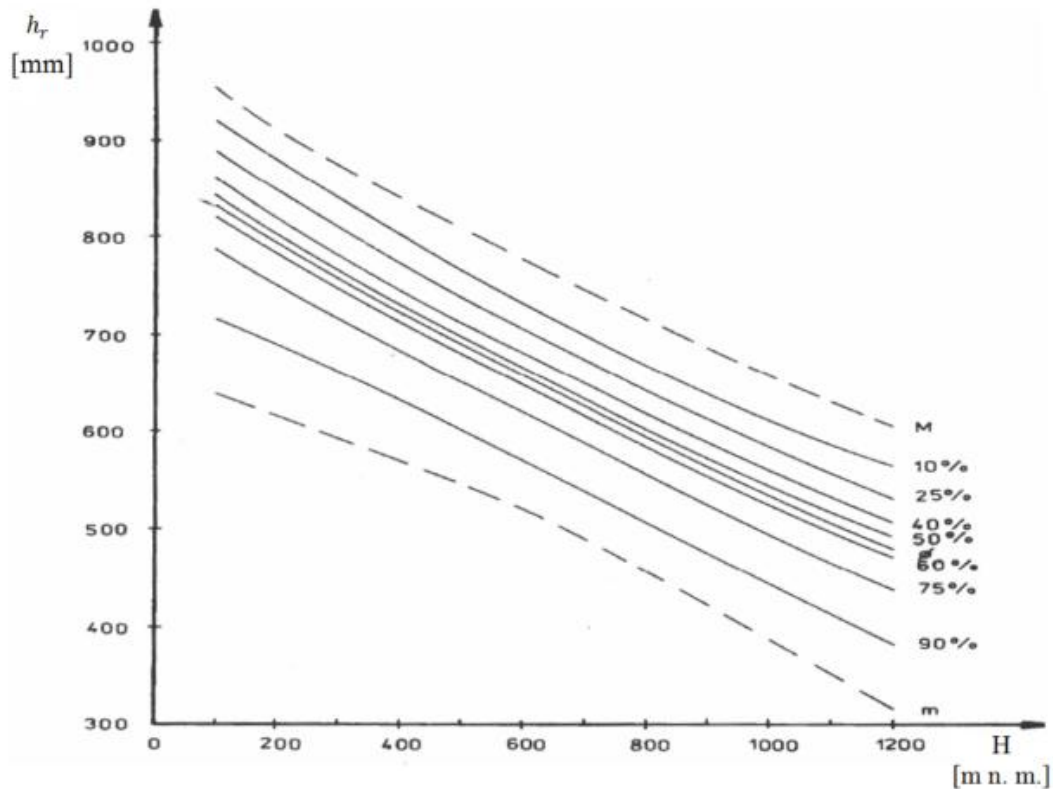
$V_{j,z}$  velikost zásobního objemu nádrže ve vrcholu  $n_j$ .

Střednímu plnění zásobního objemu odpovídá střední nadmožská výška vodní hladiny  $H_j$  a střední plocha vodní hladiny  $F_j$ . Ztráty vody z nádrží jsou pak v každém časovém kroku  $\tau$  řešení konstantní.

### **Ztráta vody výparem**

Výpar z vodní hladiny nádrže je závislý na mnoha aspektech, jako jsou: teplota, napětí par ve vzduchu, rychlost větru a velikosti plochy hladiny. Vyšší výpar nastává u menších vodních nádrží. Voda se rychleji prohřeje a výpar je tak vyšší než výpar z vodní hladiny nádrže s velkou vodní plochou.

Úhrn výparu z nádrže za rok  $h_{jr}$  ve vrcholu  $n_j$  je závislý na stupni zabezpečení výparu a na nadmožské výšce vodní hladiny – viz obr. 5.



**Obr. 5** Úhrn ročního výparu v závislosti na nadmořské výšce a stupni zabezpečení

Procentuální rozdělení úhrnu ročního výparu na úhrn měsíčního výparu  $h_{jm}$  je uvedeno v tab. 9. Pomocí úhrnu měsíčního výparu a plochy vodní hladiny  $F_j$  je možné určit ztrátový odtok způsobený výparem  $Z_j^v$ .

**Tab. 9** Procentuální rozdělení ročního výparu na každý měsíc (%).

Měsíc	Průměr	Extrémní rok		Absolutní měsíční	
		Suchý	Vlhký	Maximum	Minimum
1	1	1	1	6	0
2	2	1	1	8	0
3	6	5	5	8	1
4	9	9	11	12	5
5	12	14	11	19	7
6	14	13	16	18	10
7	16	14	15	20	12
8	15	16	12	22	9
9	11	14	11	16	7
10	7	7	9	12	4
11	5	4	7	9	1
12	2	2	1	5	1



### Ztráta průsakem tělesa hráze

Ztráta průsakem může mít stejnou nebo i větší váhu než ztráta výparem. Průsak vody  $U_j$  tělesem hráze ve vrcholu  $n_j$  je možno orientačně vypočítat dle rovnice (17)

$$U_j = K_j * I_j * A_j \quad (17)$$

kde značí:

$K_j$  filtrační koeficient ve vrcholu  $n_j$ ,

$I_j$  hydraulický spád ve vrcholu  $n_j$ ,

$A_j$  průtočnou plochu ve vrcholu  $n_j$ .

Nebo a to je vhodnější, odhadnout ztrátu vody průsakem podle zkušeností s nádržemi v obdobných klimatických podmínkách. V tab. 10 jsou uvedeny průsaky na významných přehradách v České republice (podle K. Šimka). V tabulce uvedené hodnoty představují ztrátový odtok způsobený průsakem  $Z_j^p$ .

**Tab. 10** Průsaky na významných přehradách v České republice

Typ přehrady	Počet přehrad s průsakem [ $l \cdot s^{-1}$ ]		
	Pod 5	5-20	Přes 20
zemní	17	6	2
kamenité se zemním těsněním	4	1	1
zemní a kamenité s plášťovým těsněním (železobetonovým, asfaltobetonovým, fólií PVC)	2	2	1
gravitační betonové a zděné z lomového zdiva	až na výjimky pod $0,15 l \cdot s^{-1}$ na $1000 m^2$ omočené plochy, čili jen výjimečně přes $2 l \cdot s^{-1}$		

### Ztráta netěsností uzávěrů

Ztráta způsobená netěsností uzávěrů  $Z_j^{NU}$  je uvedena výrobcem nebo se vyčte z příslušné literatury. Příslušnou literaturou je TNV 75 0910 (Dovolené průsaky uzávěrů vodních děl).

Dle zmíněné TNV 75 0910 se dělí stanovení netěsnosti uzávěrů na tyto stupně netěsnosti:

- I. Stupeň – platí pro uzávěry, u kterých je přísný požadavek na těsnost
- II. Stupeň – uzávěry, u kterých není přísný požadavek na těsnost
- III. Stupeň – průsak je součástí minimálního zůstatkového průtoku podle manipulačního řádu vodního díla

Výpočet pro I. Stupeň netěsnosti se stanoví z rovnice (18)

$$Q_z = 0,006 * D_p^{1,2} * h_p^{0,5}, \quad (18)$$

kde značí:

$Q_z$  celkový průsak uzávěru v [l.s<sup>-1</sup>],

$D_p$  jmenovitá světlost uzávěru v [m],

$h_p$  tlaková výška [m] (u prstencového těsnění od osy uzávěru k max. provozní hladině).

Vypočtené hodnoty průsaků se zaokrouhlují takto:

- $\leq 1$  l/s na 2 desetinná místa
- $1 - 100$  l/s na 1 desetinné místo
- $> 100$  l/s na celá čísla

Dle požadavků na dovolené průsaky se uzávěry zařazují do 3 stupňů netěsnosti:

- I. Stupeň netěsnosti – průsak se stanoví výpočtem dle rovnice (18)
- II. Stupeň netěsnosti – uvažuje se průsak z I. Stupně + 50% (z I. Stupně)
- III. Stupeň netěsnosti – uvažuje se průsak z I. Stupně + 100% (z I. Stupně)

### 3.6 Účinek vlivu mezipovodí

Účinek vlivu mezipovodí je možné zohlednit při řešení toku vody systémem. Pomocí členů  $Q_{PO_{i,j}}^T$  v rovnicích (7) a (8). Je možné zjednodušeně uvažovat s podzemním přítokem při řešení. Velikost podzemního přítoku je stanovena z řady neovlivněných průměrných měsíčních průtoků, která odpovídá vybranému profilu systému (narůstající průtok směrem po toku). V každém časovém kroku řešení  $\tau$  je pro každou hranu grafu  $h_{i,j} \in H$  a její délku  $L_{ij}$ , stanovena velikost podzemního přítoku  $Q_{PO_{i,j}}^T$ , který je přímo úměrný délce hrany. Při řešení optimalizačním modelem je možné podzemní přítok zcela zanedbat, protože řešení provádíme na krátkém časovém období. (Menšík, 2012)

### 3.7 Zabezpečení

Zabezpečení  $P$  řízení odtoku (regulování odtoku) obecně rozumíme pravděpodobnost, že odtok nevybočí ze stanoveného variačního rozpětí. Hranice variačního rozpětí tvoří hodnoty  $O_p$  (nalepšený odtok) a hodnota  $O_{NE}$  (neškodný odtok).

Návrhovou zabezpečeností pak rozumíme pravděpodobnost nepřekročení mezí navrhovaného variačního rozpětí řízeného odtoku. Velikost variačního rozpětí řízeného odtoku a hodnota jednotlivých mezí (horní a dolní) poskytují informaci o vyrovnanosti odtoku vody z nádrže. Poměrná hodnota se nazývá součinitel nalepšení a vzorec výpočtu je dle rovnice (19):

$$\alpha = \frac{O_p}{Q_a}, \alpha \in \langle 0,1 \rangle \quad (19)$$

kde značí:

$\alpha$  součinitel nalepšení,

$O_p$  nalepšený odtok,

$Q_a$  dlouhodobý průměrný průtok.

Všeobecně platí, že se vzrůstem zabezpečení a součinitele nalepšení se zvyšují náklady na realizaci zařízení, jímž změnu odtoku provádíme. Na druhé straně však se zvyšováním zabezpečení klesají ztráty v hospodářských výsledcích odvětví, jehož činnost je úpravou toku podmíněna.

Mírou zabezpečení nalepšeného odtoku jako výsledku řízení odtoku je pravděpodobnost, že skutečný odtok neklesne pod plánovanou hodnotu  $O_p$ . Kvantifikátorem tohoto jediného jevu pojatého ze tří různých hledisek jsou následující ukazatelé zabezpečení:

#### **Zabezpečení podle opakování $P_o$**

Je dána poměrem bezporuchových roků k celkovému počtu let ve vyšetřovaném období. U tohoto druhu zabezpečení nerozhoduje, jakým způsobem byl nalepšený odtok  $O_p$  omezen.

#### **Zabezpečení podle trvání $P_t$**

Je dána poměrem skutečného trvání bezporuchového odtoku vody k celkovému trvání vyšetřovaného období.

#### **Zabezpečení podle dodávky vody $P_d$**

Je dána poměrem skutečně odteklého množství vody k plánovanému odteklému množství ve vyšetřovaném období.

## Výpočet zabezpečení

K výpočtu míry zabezpečení je používán empirický vztah odvozený Čegodajevem dle rovnice (20):

$$P = \frac{m-0,3}{n+0,4} * 100, P \in (0, 100). \quad (20)$$

kde značí:

$m$  počet bezporuchových let, trvání bezporuchového řízení odtoku, skutečně odteklé množství vody,

$n$  celkový počet roků vyšetřovaného období, celkové trvání vyšetřovaného období, plánované odteklé množství při nalepšeném odtoku ve vyšetřovaném období.

Zabezpečení odtoku je vyjadřována v procentech (Starý, 1986).

## Třídy zabezpečení

Informace o třídách zabezpečení vycházejí z normy ČSN 75 2405. Zabezpečení sledovaných vodohospodářských účelů nádrže podle trvání by neměla klesnout pod 95%, u nejvýznamnějších účelů pod 99,5 %. Doporučené hodnoty zabezpečení podle trvání plné dodávky vody:

- Třída A  $\geq 99,5 \%$
- Třída B  $\geq 98,5 \%$
- Třída C  $\geq 97,5 \%$
- Třída D  $\geq 95,0 \%$

## 3.8 Program SOMVS

K sestavení simulačního a optimalizačního modelu vodohospodářské soustavy je použit program SOMVS (Menšík, Starý, 2012). Program SOMVS (Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy) je vytvořen v rámci disertační práce (Menšík, 2012). Program umožňuje provést návrh a přehodnocení velikosti zásobních objemů nádrží spolupracujících v rámci vodohospodářské soustavy. Program je možno použít pro optimalizované řízení zásobní funkce vodohospodářské soustavy.

Velikosti zásobních objemů jednotlivých nádrží ve vodohospodářské soustavě jsou stanoveny pomocí simulačního modelu v kombinaci s nelineární optimalizací. V řešení je možno uvažovat se ztrátami vody z nádrží, s podzemním odtokem vody z povodí a s řízením. Řízení systému zásobení vodou je založeno na teorii stavu nádrží. Teorie vychází z dispečerských grafů.

Na základě předpovězených průtoků program umožňuje najít optimální režim odtoku vody z nádrží. Optimální režim odtoku vody z nádrží je hledán pomocí přímé optimalizační metody.

Program je napsán v programovacím jazyce FORTRAN. Grafické uživatelské rozhraní je vytvořeno ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008 Express Edition za použití programovacího jazyka Microsoft Visual C#. Grafické uživatelské rozhraní uživateli umožní jednoduše zadávat vstupní hodnoty, spouštět výpočet a přehledně zobrazovat výstupní hodnoty.

Program je možno nainstalovat na počítač s 32bitovým i 64bitovým procesorem a s operačním systémem Microsoft Windows (verze XP až 7). Samotná instalace je provedena pomocí klasického instalátoru. Pro spuštění GUI musí být v počítači nainstalovaný balík knihoven Microsoft NET Framework verze 3.5 nebo novější.

## 4. Praktická aplikace

Praktická aplikace je provedena na vybraném subsystému nádrží Letovice a Boskovice v povodí řeky Svitavy. Základní technické údaje k nádržím Letovice a Boskovice jsou převzaty z manipulačních řádů daných nádrží a ty byly poskytnuty Povodím Moravy, s. p., po zažádání o potřebné informace k těmto vybraným nádržím.

Výběr časově synchronní průtokové řady je popsán v podkapitole 4.1. Schematizovaný popis vybraného subsystému je popsán pomocí orientovaného ohodnoceného grafu v podkapitole 4.2. V podkapitole 4.3 jsou omezující podmínky typu rovnic a nerovností upraveny do tvaru popisujícího uvažovaný subsystém nádrží Letovice a Boskovice. V podkapitole 4.4 jsou uvedeny potřebné informace k nádržím, které byly použity při výpočtech v programu SOMVS. V podkapitole 4.5 je popsán vliv mezipovodí.

V první části aplikace je sestaven simulační model, který je automatizovaně sestaven v programu SOMVS. K sestavení simulačního modelu je zapotřebí znát všechna potřebná data, která jsou do programu SOMVS zadávána. Následně je ověřována funkčnost sestaveného modelu v několika variantách. V rámci ověřování funkčnosti jsou měněny hodnoty nalepšených odtoků  $O_p$  z nádrží. Na základě změn nalepšených odtoků z nádrží jsou zjišťovány jejich hranice tříd zabezpečení. Simulační model je popsán v podkapitole 4.6.

V druhé části aplikace je sestaven optimalizační model - metoda diferenciální evoluce. Optimalizační model je automatizovaně sestaven v programu SOMVS. K sestavení optimalizačního modelu je zapotřebí znát všechna potřebná data, která jsou do programu SOMVS zadávána. K použití metody diferenciální evoluce je zapotřebí stanovit její parametry pro výpočet. Následně je ověřována funkčnost sestaveného modelu v několika variantách. V rámci ověřování funkčnosti jsou porovnávány výsledky jednotlivých variant. Výsledkem variant jsou nalezené maximalizované hodnoty kritériální funkce odběru vody v uzávěrovém profilu. Sestavení optimalizačního modelu je popsáno v podkapitole 4.7.

V podkapitole 4.8 jsou uvedeny výstupy simulačního a optimalizačního modelu.

### 4.1 Výběr časově synchronní průtokové řady

Před samotným řešením v programu SOMVS bylo nutné vybrat a upravit vstupní průtokovou řadu, která bude časově synchronní ve všech použitých měrných profilech (MP) přítocích subsystému nádrží. Vstupní průtokové řady jsou okrajovými podmínkami modelu.

Vybrané povodí řeky Svitavy má 5 přítoků (zdrojů) a to: vodní tok Svitava, Křetínka, Bělá, Punkva a Křtinský potok. ČHMÚ poskytlo naměřená historická data průměrných měsíčních průtoků pro dané vodní toky a vodní díla z povodí řeky Svitavy. Průtokové řady byly získány měřením v měrných profilech (MP): Rozhrání (Svitava), Prostřední Poříčí (Křetínka), přehrada Letovice (Křetínka),

přehrada Boskovice (Bělá), MP Punkva, MP Křtinský potok a Bílovice nad Svitavou (Svitava). Přehled MP, délky měření a polohy jednotlivých MP v řešeném subsystému nádrží je uvedeno v tab. 11.

**Tab. 11** Přehled měření v měrných profilech

Měrný profil	Délka měření	Tok (přítok)
Rozhraní	1926 - 2010	Svitava
Prostřední Poříčí	1978 - 1989, 2001 – 2010	pravostranný přítok řeky Svitavy
Letovice (přehrada)	1924 - 2010	pravostranný přítok řeky Svitavy
Boskovice (přehrada)	1955 - 2010	levostranný přítok řeky Svitavy
Punkva	1924 - 2012	levostranný přítok řeky Svitavy
Křtinský potok	1969 - 2012	levostranný přítok řeky Svitavy
Bílovice nad Svitavou	1921 - 2010	Svitava

Získaná data jsem prošel a snažil se najít souvislosti změn průtoků (povodně apod.) na chodu naměřených průměrných měsíčních průtoků. V získaných datech bylo zjištěno několik nejasností (chybná hodnota a výpadek měření):

- Na MP Prostřední Poříčí došlo v období 1989 (prosinec) až 2001 (leden) k výpadku měření. Důvod výpadku nebyl ČHMÚ sdělen.
- Na MP přehrada Boskovice se extrémně odlišovala naměřená hodnota průměrného měsíčního průtoků a to v roce 1978 v lednu, která byla  $13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , od ostatních hodnot naměřených ve všech jiných měsících tomto měrném profilu.

V případě výběru průtokové řady, která by obsahovala zmíněné nejasnosti, by bylo nutné je řešit.

Při výběru časově synchronní průtokové řady, bylo uvažováno s limitujícími prvky, těmi byly – výstavba přehrad: Letovice (1972-1976) a Boskovice (1985-1990) a délkou měření v jednotlivých MP viz tab. 11. Limitujícími profily byly především MP Boskovice 1955 a MP Křtinský potok 1969 (oba začátek měření).

MP přehrada Boskovice musel být zachován. Nebylo by možné jej vyloučit. Pak by nebylo možné řešit vodohospodářskou soustavu dvou nádrží. Počátek průtokové řady je tady rok 1955. Naopak MP Křtinský potok byl vyloučen ze schematizovaného ohodnoceného grafu. Naopak o rozhodnutí, koncového roku průtokové řady rozhodla výstavba přehrad Letovice (1972-1976). V prvopočátcích se uvažovalo s náhradou dat v MP přehrada Letovice daty z MP Prostřední Poříčí. Tím by došlo k výhodnému prodloužení průtokové řady, která by nebyla ovlivněna výstavbou přehrad, ani řízeným vypouštěním z nádrže. Jelikož byla přehrada Letovice na toku Křetínka stavěna v letech 1972 – 1976 a tehdy nově vybudovaný MP Prostřední Poříčí 1978, nebylo tak možné data z těchto dvou MP propojit. Tím byl zisk průtokové řady dosti zkrácen. Poslední rok použitý do časově synchronní průtokové řady je rok 1971. Délka vybrané průtokové řady je 17 let v období 1955 – 1971.

Po konzultaci s vedoucím mé bakalářské práce byla vybrána průtoková řada, která obsahuje tyto MP:

- Rozhraní
- přehrada Letovice
- přehrada Boskovice
- Punkva
- Bílovice nad Svitavou

V budoucnu by bylo možné průtokovou řadu prodloužit, ale bylo by nutné vyřešit hned několik problémů. Prvním by byla náhrada měsíční průměrné hodnoty průtoku v MP přehrada Boskovice v roce 1978 (leden). Tu by bylo možné, jak již bylo řečeno, nahradit dlouhodobou průměrnou měsíční hodnotou za celé období měření (1955-2010) MP přehrada Boskovice. Nahrazená nová hodnota by byla  $0,254 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Druhým problémem je provázanost MP přehrada Letovice a Prostřední Poříčí. Posledním problémem je výpadek měření v MP Prostřední Poříčí, v letech 1989 – 2001, který by se dal nahradit metodou regresních křivek. V této metodě je zapotřebí použít jiný MP na jiném toku v schematizované soustavě nádrží. Tímto MP by mohlo být Rozhraní, vodní tok Svitava.

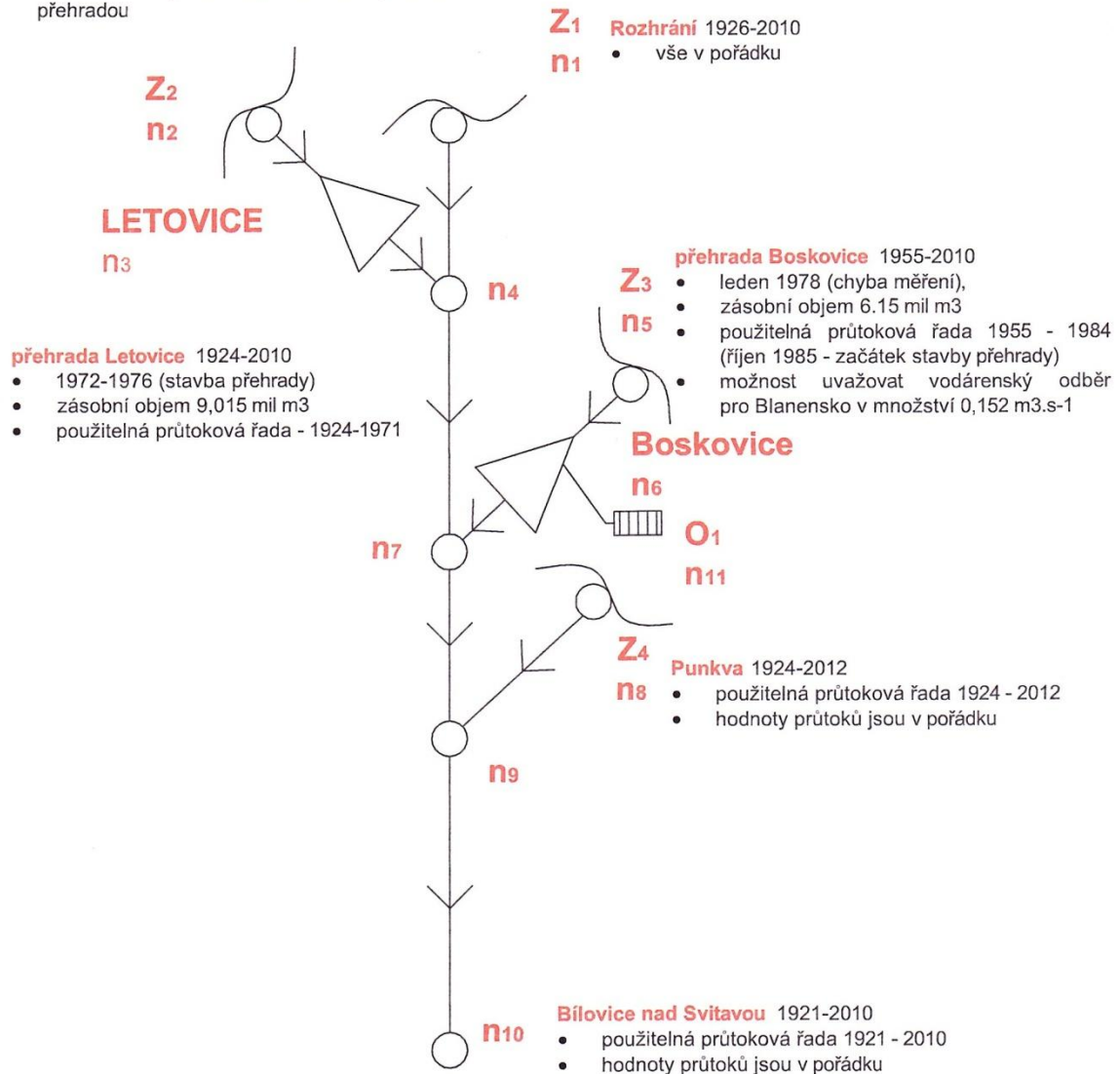
## **4.2 Schematizace vybraného subsystému nádrží**

Ohodnocený schematizovaný graf vybraného subsystému nádrží je tvořen množinou hran představující toky a to Svitava, Křetínka, Bělá a Punkva. Dále je tvořena vrcholy bez akumulace vody, což jsou přítoky do vodohospodářské soustavy a vrcholy s akumulací vody. To jsou nádrže Letovice a Boskovice. V některých variantách simulačního modelu je uvažováno s odběrem vody z nádrže Boskovice. Uzávěrovým profilem celého subsystému nádrží je měrný profil Bílovice nad Svitavou. Na obr. 6 si můžete všimnout schematizovaného ohodnoceného grafu. Obrázek obsahuje očíslování jednotlivých zdrojů, hran bez akumulace a hran s akumulací. Obrázek také obsahuje základní informace o problémech s naměřenými historickými daty na daných MP.



### Prostřední Poříčí 1978-2010

- listopad 1989 - říjen 2001 (výpadek v měření)
- limituje výběr průtokové řady z důvodu nenávaznosti na MP přehrada Letovice, kde je použitelná průtoková řada pouze do roku 1971 a tudíž chybí měření z let: 1972-1977 v profilu bez ovlivnění průtoků přehradou



### Vyhodnocení dostupných dat:

- Z důvodu získání co možná nejdelší průtokové řady bylo nutno rozhodnout o vyřazení některých MP (měrných profilů) z uvažovaného ohodnoceného grafu
- byl jsem limitován přehradami Letovice a Boskovice
- VD Boskovice nám limituje průtokovou řadu rok 1955
- VD Letovice nám limituje průtokovou řadu rok 1971
- Z tohoto důvodu byl vypuštěn MP Křtinský potok ( 1969 - 2012)

Výsledná průtoková řada je v období 1955 - 1971. Je tedy dlouhá 17 let. Tuto průtokovou řadu použijeme ve výpočtech v simulačním a optimalizačním modelu v programu SOMVS.

**Obr. 6** Výsledná schematizace MP řešeného subsystému nádrží v povodí řeky Svitavy

### 4.3 Omezující rovnice řešeného subsystému nádrží

Pro řešený subsystém nádrží jsou omezující podmínky typu rovnice a omezující podmínky nerovnosti přepsány do následujícího tvaru:

**Omezující podmínky typu rovnice:**

- Pro zdroje:

$$\underline{Q}_{1,4}^{\tau} = Q_1^{\tau} \quad (21)$$

$$\underline{Q}_{2,3}^{\tau} = Q_2^{\tau} \quad (22)$$

$$\underline{Q}_{5,6}^{\tau} = Q_5^{\tau} \quad (23)$$

$$\underline{Q}_{8,9}^{\tau} = Q_8^{\tau} \quad (24)$$

- Pro vrcholy bez akumulace:

$$Q_{1,4}^{\tau} + Q_{3,4}^{\tau} - Q_{4,7}^{\tau} + Q_{PO_{1,4}}^{\tau} + Q_{PO_{3,4}}^{\tau} = 0 \quad (25)$$

$$Q_{4,7}^{\tau} + Q_{6,7}^{\tau} - Q_{7,9}^{\tau} + Q_{PO_{4,7}}^{\tau} + Q_{PO_{6,7}}^{\tau} = 0 \quad (26)$$

$$Q_{7,9}^{\tau} + Q_{8,9}^{\tau} - Q_{9,10}^{\tau} + Q_{PO_{7,9}}^{\tau} + Q_{PO_{8,9}}^{\tau} = 0 \quad (27)$$

- Pro nádrže:

$$Q_{2,3}^{\tau} - Q_{3,4}^{\tau} - Z_3(V_3^{\tau}) + Q_{PO_{2,3}}^{\tau} = \frac{V_3^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_3^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (28)$$

$$Q_{5,6}^{\tau} - Q_{6,7}^{\tau} - Z_6(V_6^{\tau}) - Q_{6,11}^{\tau} + Q_{PO_{5,6}}^{\tau} = \frac{V_6^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_6^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (29)$$

**Omezující podmínky typu nerovnosti:**

- Pro průtok vody vnitřními hranami grafu

$$\hat{Q}_{3,4}^{\tau} \leq Q_{3,4}^{\tau} \leq \check{Q}_{3,4}^{\tau} \quad (30)$$

$$\hat{Q}_{4,7}^{\tau} \leq Q_{4,7}^{\tau} \leq \check{Q}_{4,7}^{\tau} \quad (31)$$

$$\hat{Q}_{6,7}^{\tau} \leq Q_{6,7}^{\tau} \leq \check{Q}_{6,7}^{\tau} \quad (32)$$

$$\hat{Q}_{7,9}^{\tau} \leq Q_{7,9}^{\tau} \leq \check{Q}_{7,9}^{\tau} \quad (33)$$

$$\hat{Q}_{9,10}^{\tau} \leq Q_{9,10}^{\tau} \leq \check{Q}_{9,10}^{\tau} \quad (34)$$

- **Pro nádrže**

$$\hat{V}_3^{\tau} \leq V_3^{\tau} \leq \check{V}_3^{\tau} \quad (35)$$

$$\hat{V}_6^{\tau} \leq V_6^{\tau} \leq \check{V}_6^{\tau} \quad (36)$$

- **Pro odběr vody**

$$\hat{Q}_{11}^{\tau} \leq Q_{6,11}^{\tau} \leq \check{Q}_{11}^{\tau} \quad (37)$$

#### 4.4 Parametry schematizované soustavy nádrží

K výpočtům v programu SOMVS bylo zapotřebí shromáždit data, která budou zadávána do výpočtů. Data se týkají kódových čísel definujících subsystém zásobení vodou, délek hran grafu, minimální, nalepšené a neškodné průtoky v hranách grafu pod jednotlivými nádržemi, maximální, minimální a počáteční objemy vody v nádržích Letovice a Boskovice.

V tab. 12 jsou zobrazena kódová čísla označující vybraný subsystém zásobení vodou a délky hran grafu. Do programu je vložena konfigurace uvažovaného subsystému pomocí kódových čísel. Délky hran jsou odměřeny z mapy a umožňují při řešení zohlednit účinek mezipovodí.

V simulačním modelu je v některých variantách uvažováno se ztrátami vody z nádrží. Ztráty jsou uvažovány pomocí zjednodušeného výpočtu. Ztráty, jak již bylo napsáno v kapitole 3.5, jsou trojího typu a to: ztráty vody výparem z vodní hladiny, ztráta vody tělesem hráze nebo dnem tělesa přehrady a ztráta netěsností uzávěrů. Vstupní parametry pro všechny typy ztrát vody jsou popsány a vyčísleny níže v kapitole.

**Tab. 12** Kódová čísla definující subsystém zásobení vodou a délky hran grafu

Číslo počátečního vrcholu $i$	Číslo koncového vrcholu $j$	Délka hrany $L_{ij}$ [m]
1	4	500
2	3	500
3	4	3000
4	7	10000
5	6	500
6	7	7000
7	9	15000
8	9	500
9	10	10000
10	0	0

V tab. 13 jsou uvedeny minimální a neškodné průtoky v hranách grafu pod přehradami. Tyto hodnoty byly získány z manipulačních řádů jednotlivých přehrad Letovice a Boskovice.

**Tab. 13** Minimální a neškodné průtoky v hranách grafu pod jednotlivými nádržemi

	Letovice	Boskovice
$Q_{\min}$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	0,100	0,034
$Q_{NE}$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	7,000	8,000

Minimální průtok odpovídá minimálnímu zůstatkovému průtoku, který byl stanoven pro jednotlivé toky. Neškodný průtok odpovídá kapacitě, při které nedojde k rozlivu vody koryta vodního toku.

V tab. 14 jsou uvedeny maximální, minimální a počáteční objemy nádrží, které jsou zadávány do výpočtu v programu SOMVS. Objemy počáteční a maximální jsou v obou řešených modelech stejné. Rozdílné jsou však minimální objemy  $\hat{V}_j^{\tau}$  simulace a  $\hat{V}_j^{\tau}$  optimalizace. U simulačního modelu odpovídá minimální objemu objemu stálého nadržení. Minimální objem u optimalizačního modelu je uvažován jako objem stálého nadržení a k němu je přičtena polovina objemu prostoru zásobního. Objem byl volen tak, aby bylo zamezeno úplnému vyprázdnění zásobního prostoru.

**Tab. 14** Maximální, minimální a počáteční objemy nádrží

	Letovice $j=3$	Boskovice $j=6$
$\hat{V}_j^T$ simulace [m <sup>3</sup> ]	1 560 661	424 746
$\check{V}_j^T$ [m <sup>3</sup> ]	10 575 858	6 577 053
$V_j^0$ [m <sup>3</sup> ]	10 575 858	6 577 053
$\hat{V}_j^T$ optimalizace [m <sup>3</sup> ]	6 068259,5	3 500 899,5

**Ztráta vody výparem z vodní hladiny**

Při určení ztrát vody výparem z vodní hladiny je nutno znát nadmořskou výšku hladiny vody vztažené ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže a plochu vodní hladiny vztaženou taktéž ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže. Také je nutné stanovit stupeň zabezpečení, ten byl zvolen průměrný. Stupeň zabezpečení se volil přímo v programu výběrem v dialogovém okně určeným pro výběr stupně zabezpečení. Při zjištění potřebných dat se vycházelo z manipulačních řádů řešených nádrží Letovice a Boskovice. Zmíněné potřebné informace jsou sepsány v tab. 15.

**Tab. 15** Hodnoty pro stanovení ztrát vody výparem z vodní hladiny řešených nádrží

	Letovice $j=3$	Boskovice $j=6$
Nadmořská výška hladiny vztažená ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže [m n. m.]	354,88	423,56
Plocha vodní hladiny vztažená ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže [m <sup>2</sup> ]	698 778,89	354 595,3

**Ztráta vody průsakem tělesa hráze**

Při stanovení ztrát vody průsakem tělesa hráze se vychází z tab. 10. Odborným odhadem jsem určil ztrátu vody průsakem tělesa hráze na 4 l.s<sup>-1</sup>. Je tomu tak u obou hrází. Typ hráze byl určen z manipulačních řádů přehrad Letovice a Boskovice.

**Ztráta vody netěsností uzávěrů**

Pro přesné stanovení ztrát netěsností uzávěrů na přehradách Letovice a Boskovice jsem vyšel z normy TNV 75 0910 - Dovolené průsaky uzávěrů vodních děl. V normě jsem našel potřebné informace, jak zjistit s dostatečnou přesností ztrátu vody netěsností uzávěrů.

Na přehradě Letovice jsou dvě výpusti DN 700 s kuželovými uzávěry s prstencovým těsněním. Na přehradě Boskovice jsou dvě výpusti DN 800 taktéž s kuželovými uzávěry s prstencovým těsněním.

Bylo uvažováno s II. stupněm netěsnosti. Potřebná data k výpočtu a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 16.

**Tab. 16** Hodnoty průsaku netěsností uzávěrů výpustních objektů

	Letovice $j=3$	Boskovice $j=6$
Nadm. Výška osy potrubí [m n. m.]	335.85	392.1
Nadm. Výška max. provozní hladiny [m n. m.]	360.1	430
$h_p$ [m]	24.25	37.9
$D_p$ [m]	0.7	0.8
$Q_z$ [l.s <sup>-1</sup> ]	0.07	0.07

### Odběr vody

U VD Boskovice je součástí jejího objemu akumulace vody pro vodárenské účely. Je uvažováno s odběrem vody 0,152 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Jedná se o vodárenský odběr pro oblast Blanenska a Boskovicka. V současné době však není s odběrem uvažováno. V práci však bylo v určitých variantách uvažováno s odběrem vody, protože je možné, že se odběr vody pro vodárenské účely opět obnoví. Hodnoty průměrných měsíčních odběrů jsou uvedeny v tab. 17. Hodnoty vycházejí z Manipulačního řádu pro přehradu Boskovice.

**Tab. 17** Průměrný měsíční odběr z nádrže Boskovice v m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben
0,152	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152
Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
0,152	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152

## 4.5 Vliv mezipovodí

Vliv mezipovodí je zahrnut do některých variant výpočtu simulačního modelu. Vlivem mezipovodí je myšleno paušální přidání přítoku po délce jednotlivých vnitřních hran. Velikost podzemního přítoku je stanovena z řady neovlivněných průměrných měsíčních průtoků. Průtoková řada použitá v simulačním modelu je z let 1955 až 1971, kdy ještě nebyly postaveny přehrady Letovice a Boskovice. Je tedy možné přímo do dialogového okna v programu SOMVS, které slouží k vložení dat neovlivněných průtoků, zadat hodnoty měřených průměrných měsíčních průtoků v uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou. Jsou tak zahrnuty přítoky, které nemají velký význam nebo přítoky, na kterých nejsou prováděna měření. Tyto přítoky nejsou významné při stanovení schematizovaného grafu subsystému nádrží. Hodnoty vlivu mezipovodí jsou uvedeny v tab. 18.

**Tab. 18** Hodnoty neovlivněných průtoků řešeného subsystému nádrží

Hodnoty neovlivněných průtoků [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]												
Měsíc/rok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1955	2.97	3.62	4.05	4.13	1.72	1.57	1.97	1.59	1.24	0.99	0.89	0.82
1956	1.00	1.88	4.80	2.05	3.83	0.86	0.68	0.63	0.65	0.80	1.47	1.21
1957	1.03	1.82	2.52	3.88	1.16	0.48	0.76	0.72	1.14	1.00	0.64	0.76
1958	1.13	2.87	2.12	3.64	1.20	0.50	1.54	0.97	0.67	2.25	1.50	1.95
1959	2.56	0.94	2.26	1.14	1.21	0.49	0.93	2.17	0.48	0.40	0.59	0.85
1960	1.66	1.50	5.42	1.45	1.27	1.76	1.21	1.11	2.01	2.99	1.95	2.02
1961	1.29	4.24	2.35	1.36	1.42	3.99	0.83	0.73	0.81	0.70	1.10	1.22
1962	1.44	2.37	4.71	8.26	7.90	2.97	1.05	0.56	0.63	0.55	1.45	0.90
1963	0.82	0.75	4.47	4.61	5.00	1.43	0.67	0.75	0.86	0.59	0.57	0.33
1964	0.35	0.56	2.38	1.86	0.93	0.83	0.57	0.83	0.86	2.28	1.70	1.56
1965	1.40	1.32	9.71	4.73	5.13	8.35	4.07	1.73	1.61	1.20	1.28	1.59
1966	1.54	5.12	2.12	1.76	1.42	1.48	4.62	3.94	2.92	1.53	1.95	2.49
1967	2.87	6.03	5.73	3.86	2.54	2.04	1.32	0.93	2.00	0.82	0.84	1.52
1968	3.07	4.47	4.26	1.77	1.51	1.14	0.75	1.07	1.42	1.31	1.83	1.19
1969	1.05	1.68	4.30	3.65	1.60	1.51	1.91	1.29	0.93	1.17	1.34	1.27
1970	1.36	1.21	8.36	11.88	1.56	1.60	0.88	3.56	1.66	1.33	2.25	1.94
1971	2.74	3.38	2.96	2.41	1.13	0.97	0.83	0.76	0.71	1.12	0.86	1.35

## 4.6 Simulační model

V simulačním modelu je možné řešit výpočet optimalizačními metodami nebo pouze simulací. V práci je uvažováno s výpočtem pomocí simulace, čímž je myšlen výpočet pouze jedné varianty. Není tedy hledáno optimální řešení pomocí optimalizačních metod. Varianta řešená v simulačním modelu je rozdělena na 8 variant, které se liší jednotlivou kombinací daných problematik: ztráta vody z nádrží, vliv mezipodvodi a odběr vody z nádrže Boskovice. Popis jednotlivých variant je níže v této podkapitole.

K sestavení simulačního modelu řešeného subsystému nádrží Letovice a Boskovice je použit program SOMVS. V grafickém rozhraní programu je vytvořen projekt, pomocí kterého jsou do programu vkládána vstupní data potřebná k sestavení simulačního modelu. Přesný postup vkládání dat nebude součástí bakalářské práce. Toto téma je již obsaženo v jiných bakalářských pracích, které byly vytvořeny v roce 2013 a také v disertační práci (Menšík, 2012), proto není nutné tento postup opět popisovat.

Data potřebná k výpočtu se zadávají do dialogových oken programu SOMVS, která jsou přesně definovaná. Je nutné vyplnit potřebné hodnoty, jinak není možné postupovat dále v zadávání dalších potřebných parametrů pro výpočet. Druhy dat pro výpočet se liší v každé variantě. Základní data pro zadávání jsou však stejná ve všech variantách, ale odlišné je zadávání jednotlivých typů problematik. Po sestavení jednotlivých variant je proveden výpočet. Jsou měněny hodnoty nalepšených odtoků  $O_p$ . Hodnota nalepšeného odtoku je vždy stejná pro každý časový krok výpočtu  $\tau$ . Pokud byl zadáván odběr vody z nádrže Boskovice, tak byla hodnota stanovena na  $0,152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato hodnota je stejná pro každý časový krok.

Po sestavení všech 8 variant simulačního modelu jsou provedeny výpočty. Jsou hledány hranice jednotlivých tříd zabezpečení nalepšeného odtoku vody z nádrží Letovice a Boskovice. Po výpočtu všech variant řešených v simulačním modelu dojde k ověření logické posloupnosti výsledků. Výsledky jsou posouzeny srovnáním jednotlivých variant.

### **Varianty simulačního modelu**

#### **Označení jednotlivých symbolů typů problematiky:**

1 – Beze ztrát

2 – Se ztrátami

A – Bez podzemního odtoku

B – S podzemním odtokem

I – Bez odběru vody

II – S odběrem vody  $0,152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

#### **Přehled jednotlivých variant řešených v simulačním modelu v programu SOMVS:**

1-A-I BEZE ZTRÁT - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - BEZ ODBĚRU

1-A-II BEZE ZTRÁT - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - S ODBĚREM VODY  $0.152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

1-B-I BEZE ZTRÁT - S PODZEMNÍM ODTOKEM - BEZ ODBĚRU

1-B-II BEZE ZTRÁT - S PODZEMNÍM ODTOKEM - S ODBĚREM VODY  $0.152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

2-A-I SE ZTRÁTAMI - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - BEZ ODBĚRU

2-A-II SE ZTRÁTAMI - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - S ODBĚREM VODY  $0.152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

2-B-I SE ZTRÁTAMI - S PODZEMNÍM ODTOKEM - BEZ ODBĚRU

2-B-II SE ZTRÁTAMI - S PODZEMNÍM ODTOKEM - S ODBĚREM VODY  $0.152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



## 4.7 Optimalizační model

Optimalizační model je sestaven automatizovaně v programu SOMVS. V grafickém rozhraní programu je vytvořen projekt, pomocí kterého jsou do programu vkládána vstupní data. Data potřebná k sestavení optimalizačního modelu jsou popsána v kapitole 4 a následných podkapitolách. Přesný postup vkládání dat není součástí bakalářské práce. Toto téma je již obsaženo v disertační práci (Mensík, 2012), proto není nutné tento postup opět popisovat.

V optimalizačním modelu je možno řešit úlohu optimálního řízení nebo úlohu optimálního rozvoje. V práci je řešena úloha optimálního řízení a je využita metoda diferenciální evoluce, která je popsána v podkapitole 3.4. V optimalizačním modelu je uvažováno s průtokovou řadou dlouhou jeden rok. Výběr průtokové řady pro optimalizační model je uvažován ze získané průtokové řady určené pro simulační model, která je dlouhá 17 let a to v období let 1955 – 1971. Z historické průtokové řady jsou vybrány 2 roky (nejvíce vodný rok a nejméně vodný rok), na kterých je proveden výpočet. V optimalizačním modelu jsou řešeny 4 varianty. Varianty se odlišují zadávanými parametry do dialogových oken programu SOMVS. Jsou voleny parametry lineárních kriteriálních funkcí, parametry diferenciální evoluce a také parametry týkající se řešeného subsystému nádrží. Hodnoty jednotlivých parametrů metody diferenciální evoluce a body kriteriálních funkcí jsou popsány níže v této podkapitole.

Po sestavení všech čtyř variant optimalizačního modelu je proveden výpočet. Účelem práce je nalezení maximalizované kriteriální funkce odběru vody v uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou. Hodnoty kriteriálních funkcí jsou zapsány a porovnány. Výsledky jsou ověřeny z pohledu logické posloupnosti zadaných parametrů. Výsledky by měly ukazovat zvýšenou hodnotu kriteriální funkce při odběru vody z nádrže Boskovice.

### Diferenciální evoluce

Pro nalezení optimálního toku vody v uvažovaném subsystému nádrží je v optimalizačním modelu použita optimalizační metoda diferenciální evoluce. V tab. 19 jsou uvedeny hodnoty parametrů diferenciální evoluce, se kterými je hledáno optimální řešení.

**Tab. 19** Parametry diferenciální evoluce

Mutační konstanta	Práh křížení	Počet generací	Počet jedinců
0,6	0,7	400	600

### Varianty optimalizačního modelu

V optimalizačním modelu jsou řešeny 4 varianty. Každá varianta je složena ze dvou druhů problematik.

### Označení jednotlivých symbolů typů problematiky:

1 – S odběrem vody  $0,152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

2 – Bez odběru vody

MAX – nejvíce vodný rok historické průtokové řady řešeného subsystému nádrží

MIN – nejméně vodný rok historické průtokové řady řešeného subsystému nádrží

### Přehled jednotlivých variant řešených v optimalizačním modelu v programu SOMVS:

1-MAX

1-MIN

2-MAX

2-MIN

### Kriteriální funkce optimalizačního modelu

Pro řešení úlohy optimálního řízení jsou definovány dvě kriteriální funkce. První kriteriální funkcí je pro odběr vody  $n_{11}$  z nádrže Boskovice  $n_6$ . Druhá kriteriální funkce je pro případný odběr vody fiktivním odběratelem, který by odebíral vodu z toku v místě vrcholu  $n_{10}$  (uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou). Obě funkce jsou lineární a zadané pomocí dvou bodů viz tab. 20.  $X$ -ová souřadnice je argumentem kriteriální funkce a odpovídá velikosti odběru a průtoku v jednotkách  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Funkční hodnota  $f_N(X)$  je zvolena tak, aby byla při řešení vždy nalezena maximální možná hodnota odběru a maximální možný odtok ze systému. Funkční hodnota má bezrozměrný tvar.

**Tab. 20** Body lineární kriteriální funkce optimalizačního modelu

		bod krit. funkce X1	bod krit. funkce X2
Průtok (Bílovice nad Svitavou)	$X$	0	35
	$f_N(X)$	0	1000
Odběr (nádrž Boskovice)	$X$	0	0,2
	$f_N(X)$	0	10000

Kriteriální funkce jsou zvoleny tak, aby byly ověřeny logické posloupnosti jednotlivých variant sestavených v optimalizačním modelu vybraného subsystému nádrží. Ve variantách s odběrem vody z nádrže Boskovice pro vodárenské účely, viz výše v této podkapitole, má kriteriální funkce vyšší preferenci. U varianty, kde není uvažováno s odběrem vody z nádrže Boskovice, je uvažováno pouze s jednou kriteriální funkcí a to pro odběr vody v uzavěrovém profilu Bílovice nad Svitavou.

## 4.8 Zpracování výstupů z programu

Výstupy z programu SOMVS - simulační model, optimalizační model. V simulačním modelu jsou hledány hranice jednotlivých tříd zabezpečení průtoků vody pod nádržemi na základě volby nalepšeného odtoku  $\sigma_p$ . Bylo řešeno 8 variant, které se odlišovaly jednotlivými typy problematik – ztráta vody z nádrží, vliv mezipovodí a odběr vody z nádrže Boskovice. Výsledky simulačního modelu jsou uvedeny v podkapitole 4.8.1.

V optimalizačním modelu jsou hledány maximální hodnoty kritériálních funkcí pro odběr vody v uzavřeném profilu Bílovice nad Svitavou. V optimalizačním modelu byly řešeny 4 varianty. Odlišovaly se jednotlivými typy problematik – odběr vody z nádrže Boskovice a volbou přítoků vody do vybrané vodohospodářské soustavy nádrží v povodí řeky Svitavy. Výsledky optimalizačního modelu jsou uvedeny v podkapitole 4.8.2.

### 4.8.1 Výstupy simulačního modelu

Pro 8 variant simulačního modelu jsou nalezeny jednotlivé hranice tříd zabezpečení průtoků vody pod nádržemi. Byly měněny nalepšené odtoky z nádrží v programu SOMVS a hledány zabezpečení průtoků ve vodním toku pod nádržemi. V tab. 21 je přehled jednotlivých tříd zabezpečení. Třída zabezpečení D je volena 90 procent. Norma ČSN 75 2405 udává hodnotu 95 procent, jak je již uvedeno v podkapitole 3.7. Změna hodnoty třídy zabezpečení D je volena s ohledem na získání většího množství dat z výpočtů. Pro přehlednost výsledků jsem barevně označil jednotlivé třídy zabezpečení. Barvy jednotlivých tříd zabezpečení korespondují s výsledky simulačního modelu z programu SOMVS, ty jsou uvedeny v tab. 22 až tab. 29. V tab. 22 až tab. 29 jsou uvedeny průtoky a zabezpečení – dle trvání, dle dodávky vody a v případě odběru vody byla zapisována i zabezpečení odběru vody také dle trvání a dle dodávky vody.

**Tab. 21** Třídy zabezpečení

Třídy zabezpečení $P_{op}$			
A	B	C	D
>99.5	98.5	97.5	90
100-99.5	99.5-98.5	98.5-97.5	97.5-90

**Tab. 22** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-A-I

1-A-I (BEZE ZTRÁT - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - BEZ ODBĚRU)							
Letovice				Boskovice			
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
1.00	35.57	1.00	63.21	0.50	55.14	0.50	72.81
0.70	72.26	0.70	86.28	0.38	83.02	0.38	88.41
0.69	73.73	0.69	87.15	0.37	84.49	0.37	89.78
0.67	76.66	0.67	88.98	0.36	86.94	0.36	91.14
0.66	77.15	0.66	89.93	0.34	89.38	0.34	93.33
0.65	79.11	0.65	90.91	0.33	91.34	0.33	93.93
0.59	88.89	0.59	96.45	0.32	91.34	0.32	94.25
0.58	91.83	0.58	97.36	0.31	91.83	0.31	94.58
0.57	94.28	0.57	98.31	0.30	92.81	0.30	94.94
0.56	96.23	0.56	98.82	0.29	92.81	0.29	95.33
0.55	96.72	0.55	99.07	0.28	93.79	0.28	95.74
0.54	98.19	0.54	99.30	0.27	94.28	0.27	96.18
0.53	98.19	0.53	99.54	0.26	94.77	0.26	96.65
0.52	99.17	0.52	99.78	0.25	95.74	0.25	97.17
0.51	99.66	0.51	100	0.24	96.23	0.24	97.72
0.50	99.66	0.50	100	0.23	97.21	0.23	98.33
				0.22	97.70	0.22	98.94
				0.21	98.68	0.21	99.57
				0.20	99.66	0.20	100

**Tab. 23** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-A-II

1-A-II (BEZE ZTRÁT - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - S ODBĚREM VODY 0.152 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )									
Letovice				Boskovice					
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Odběr vody	
								Zabezpečení dle trvání [%]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.80	55.63	0.80	77.33	0.70	22.36	0.70	49.84	16.49	19.06
0.66	77.15	0.66	89.93	0.30	73.24	0.30	82.98	65.90	70.24
0.65	79.11	0.65	90.91	0.25	81.07	0.25	88.30	77.64	80.25
0.60	86.94	0.60	95.46	0.24	83.02	0.24	89.69	80.58	81.92
0.59	88.89	0.59	96.45	0.23	84.98	0.23	91.00	82.53	83.74
0.58	91.83	0.58	97.36	0.21	88.89	0.21	93.16	86.45	87.72
0.57	94.28	0.57	98.31	0.20	90.36	0.20	94.28	87.43	89.4
0.56	96.23	0.56	98.82	0.19	91.34	0.19	94.91	89.38	90.94
0.55	96.72	0.55	99.07	0.18	91.83	0.18	95.46	90.85	91.93
0.54	98.19	0.54	99.54	0.16	92.81	0.16	96.3	91.83	92.63
0.53	98.19	0.53	99.54	0.15	93.3	0.15	96.56	92.81	93.20
0.52	99.17	0.52	99.78	0.14	93.79	0.14	97.22	92.81	93.43
0.51	99.66	0.51	100	0.13	94.28	0.13	97.53	93.30	94.04
				0.12	95.25	0.12	97.92	94.28	94.64
				0.11	96.23	0.11	98.17	94.77	95.38
				0.10	96.72	0.10	98.45	95.74	96.14
				0.09	97.7	0.09	99.07	96.23	96.74
				0.08	98.19	0.08	99.39	96.72	97.58
				0.07	98.68	0.07	99.58	97.70	98.47
				0.06	99.66	0.06	99.84	98.68	99.28
				0.05	99.66	0.05	100	99.66	100
				0.04	99.66	0.04	100	99.66	100

**Tab. 24** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-B-I

1-B-I (BEZE ZTRÁT - S PODZEMNÍM ODTOKEM - BEZ ODBĚRU)							
Letovice				Boskovice			
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.68	77.64	0.68	89.99	0.50	59.54	0.50	75.92
0.67	79.11	0.67	90.85	0.40	82.53	0.40	88.42
0.66	81.56	0.66	91.38	0.39	84.00	0.39	89.73
0.64	83.02	0.64	93.53	0.38	86.45	0.38	90.98
0.62	86.45	0.62	95.35	0.37	87.43	0.37	92.26
0.61	88.41	0.61	96.30	0.36	89.38	0.36	93.36
0.60	90.85	0.60	97.19	0.35	90.36	0.35	93.96
0.59	93.79	0.59	98.09	0.34	91.34	0.34	94.36
0.58	94.77	0.58	98.71	0.33	92.32	0.33	94.68
0.57	96.23	0.57	98.95	0.32	92.32	0.32	95.02
0.56	97.70	0.56	99.18	0.31	92.81	0.31	95.38
0.55	98.19	0.55	99.41	0.30	93.30	0.30	95.77
0.54	98.68	0.54	99.64	0.29	93.79	0.29	96.18
0.53	99.17	0.53	99.88	0.28	94.77	0.28	96.62
0.52	99.66	0.52	100	0.27	95.74	0.27	97.10
0.51	99.66	0.51	100	0.26	96.23	0.26	97.61
				0.25	96.72	0.25	98.16
				0.24	97.70	0.24	98.73
				0.23	98.19	0.23	99.29
				0.22	99.17	0.22	99.91
				0.21	99.66	0.21	100
				0.20	99.66	0.20	100

**Tab. 25** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-B-II

1-B-II (BEZE ZTRÁT - S PODZEMNÍM ODTOKEM - S ODBĚREM VODY 0.152 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )									
Letovice				Boskovice					
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Odběr vody	
								Zabezpečení dle trvání [%]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.68	77.64	0.68	90.23	0.26	83.51	0.26	89.94	81.56	82.24
0.67	80.09	0.67	91.18	0.25	84.98	0.25	91.01	83.02	84.31
0.66	81.56	0.66	92.02	0.22	90.36	0.22	94.50	87.43	89.06
0.64	83.02	0.64	93.73	0.21	91.34	0.21	94.95	89.87	91.22
0.62	86.94	0.62	95.56	0.20	91.83	0.20	95.60	90.36	91.84
0.61	88.89	0.61	96.50	0.18	92.81	0.18	96.43	92.32	92.67
0.6	91.34	0.6	97.38	0.17	93.30	0.17	96.75	92.32	93.14
0.59	94.28	0.59	98.29	0.16	93.79	0.16	97.38	92.81	93.33
0.58	94.77	0.58	98.76	0.15	94.28	0.15	97.65	93.30	93.95
0.57	96.23	0.57	99.00	0.14	95.25	0.14	97.94	93.79	94.60
0.56	98.19	0.56	99.22	0.13	95.74	0.13	98.19	94.77	95.31
0.55	98.19	0.55	99.45	0.12	96.23	0.12	98.38	95.74	96.11
0.54	98.68	0.54	99.68	0.11	97.21	0.11	98.96	96.23	96.64
0.53	99.17	0.53	99.93	0.10	98.19	0.10	99.38	96.72	97.36
0.52	99.66	0.52	100	0.09	98.68	0.09	99.57	97.70	98.23
				0.08	99.17	0.08	99.84	98.19	99.00
				0.07	99.66	0.07	100	99.17	99.85
				0.06	99.66	0.06	100	99.66	100
				0.05	99.66	0.05	100	99.66	100

**Tab. 26** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-A-I

2-A-I (SE ZTRÁTAMI - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - BEZ ODBĚRU)							
Letovice				Boskovice			
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.68	71.28	0.68	85.72	0.36	84.49	0.36	89.03
0.66	74.71	0.66	87.55	0.35	85.96	0.35	90.45
0.64	77.15	0.64	89.48	0.34	87.43	0.34	91.81
0.63	79.60	0.63	90.49	0.32	90.85	0.32	93.56
0.60	82.63	0.60	93.24	0.28	92.81	0.28	94.99
0.58	86.94	0.58	95.17	0.26	93.79	0.26	95.85
0.57	87.92	0.57	96.19	0.25	94.77	0.25	96.33
0.56	90.85	0.56	97.14	0.24	95.74	0.24	96.85
0.55	93.79	0.55	98.11	0.23	96.23	0.23	97.42
0.54	95.74	0.54	98.71	0.22	96.72	0.22	98.04
0.53	96.72	0.53	98.96	0.21	97.70	0.21	98.71
0.52	97.70	0.52	99.21	0.20	98.19	0.20	99.35
0.51	98.19	0.51	99.47	0.19	99.66	0.19	100
0.50	99.17	0.50	99.72	0.18	99.66	0.18	100
0.49	99.17	0.49	99.99				
0.48	99.66	0.48	100				



**Tab. 27** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-A-II

2-A-II (SE ZTRÁTAMI - BEZ PODZEMNÍHO ODTOKU - S ODBĚREM VODY 0.152 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )									
Letovice				Boskovice					
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Odběr vody	
								Zabezpečení dle trvání [%]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.64	77.15	0.64	89.48	0.35	61.50	0.35	75.73	54.16	58.21
0.63	79.60	0.63	90.49	0.30	71.77	0.30	81.28	62.96	67.00
0.62	81.07	0.62	91.43	0.25	79.60	0.25	86.41	74.22	77.43
0.61	82.05	0.61	92.32	0.22	84.98	0.22	89.99	82.05	83.43
0.58	86.94	0.58	95.17	0.21	86.94	0.21	91.15	83.51	85.42
0.57	87.92	0.57	96.19	0.20	87.92	0.20	92.34	84.98	87.34
0.56	90.85	0.56	97.14	0.19	90.36	0.19	93.68	86.94	88.87
0.55	93.79	0.55	98.11	0.18	91.34	0.18	94.30	89.38	90.69
0.54	95.74	0.54	98.71	0.17	91.83	0.17	94.90	90.36	91.78
0.53	96.72	0.53	98.96	0.16	92.32	0.16	95.32	91.34	92.30
0.52	97.70	0.52	99.21	0.15	92.81	0.15	95.73	91.83	92.65
0.51	98.19	0.51	99.47	0.13	93.30	0.13	96.90	92.81	93.22
0.50	99.17	0.50	99.72	0.12	94.28	0.12	97.20	93.30	93.84
0.49	99.17	0.49	99.99	0.11	94.77	0.11	97.53	93.79	94.48
0.48	99.66	0.48	100	0.10	96.23	0.10	97.80	94.28	95.20
0.47	99.66	0.47	100	0.09	96.23	0.09	97.94	95.25	96.04
				0.08	97.21	0.08	98.52	96.23	96.66
				0.07	98.19	0.07	99.21	96.72	97.31
				0.06	98.68	0.06	99.48	97.7	98.22
				0.05	99.17	0.05	99.81	98.19	99.02
				0.04	99.66	0.04	100	99.17	99.90
				0.034	99.66	0.034	100	99.66	100

**Tab. 28** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-B-I

2-B-I (SE ZTRÁTI - S PODZEMNÍM ODTOKEM - BEZ ODBĚRU)							
Letovice				Boskovice			
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.68	74.71	0.68	87.69	0.38	83.51	0.38	89.02
0.66	77.64	0.66	89.56	0.37	85.47	0.37	90.32
0.65	79.11	0.65	90.54	0.36	86.94	0.36	91.61
0.60	86.45	0.60	95.06	0.35	88.89	0.35	92.89
0.58	89.87	0.58	96.96	0.34	90.36	0.34	93.56
0.57	93.79	0.57	97.90	0.33	91.83	0.33	94.05
0.56	95.25	0.56	98.58	0.32	92.32	0.32	94.37
0.55	96.23	0.55	98.85	0.31	92.32	0.31	94.71
0.54	97.21	0.54	99.09	0.30	92.81	0.30	95.08
0.53	98.19	0.53	99.33	0.28	93.79	0.28	95.88
0.52	98.68	0.52	99.57	0.26	95.25	0.26	96.81
0.51	99.17	0.51	99.83	0.25	95.74	0.25	97.33
0.50	99.66	0.50	100	0.24	96.72	0.24	97.89
0.49	99.66	0.49	100	0.23	97.21	0.23	98.50
				0.22	98.19	0.22	99.09
				0.21	99.17	0.21	99.72
				0.20	99.66	0.20	100
				0.19	99.66	0.19	100

**Tab. 29** Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-B-II

2-B-II (SE ZTRÁTAMI - S PODZEMNÍM ODKOEM - S ODBĚREM VODY 0.152 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )									
Letovice				Boskovice					
Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle trvání [%]	Nalepšený odtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]	Odběr vody	
								Zabezpečení dle trvání [%]	Zabezpečení dle dodávky vody [%]
0.68	74.71	0.68	87.69	0.24	84.98	0.24	89.88	81.56	83.42
0.66	77.64	0.66	89.56	0.23	85.96	0.23	91.28	83.51	84.91
0.65	79.11	0.65	90.54	0.22	87.92	0.22	92.16	85.47	87.02
0.60	86.45	0.60	95.06	0.21	88.89	0.21	93.57	86.94	88.28
0.58	89.87	0.58	96.96	0.20	91.34	0.20	94.38	88.41	90.42
0.57	93.79	0.57	97.90	0.19	91.83	0.19	94.97	90.36	91.52
0.56	95.25	0.56	98.58	0.18	92.32	0.18	95.45	91.83	92.26
0.55	96.23	0.55	98.85	0.17	92.81	0.17	95.79	92.32	92.65
0.54	97.21	0.54	99.09	0.16	93.30	0.16	96.36	92.32	92.83
0.53	98.19	0.53	99.33	0.15	93.30	0.15	96.82	92.81	93.20
0.52	98.68	0.52	99.57	0.14	94.28	0.14	97.30	92.81	93.62
0.51	99.17	0.51	99.83	0.13	95.25	0.13	97.60	93.79	94.25
0.50	99.66	0.50	100	0.12	95.74	0.12	97.84	94.28	94.97
0.49	99.66	0.49	100	0.11	96.23	0.11	97.97	94.77	95.80
0.48	99.66	0.48	100	0.10	96.72	0.10	98.49	95.74	96.38
				0.09	97.70	0.09	98.95	96.23	97.08
				0.08	98.19	0.08	99.31	97.21	97.88
				0.07	98.68	0.07	99.58	98.19	98.68
				0.06	99.17	0.06	99.86	98.68	99.48
				0.05	99.66	0.05	100	99.66	100
				0.04	99.66	0.04	100	99.66	100

#### 4.8.2 Výstupy optimalizačního modelu

Pro 4 varianty optimalizačního modelu jsou nalezeny jednotlivé maximalizované kritériální funkce odběru vody v uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou. Výsledky výpočtů v programu SOMVS jsou uvedeny v tab. 30 až tab. 33. Hodnoty uvedené v tab. 30 až tab. 33 jsou hodnoty průtoků jednotlivých vnitřních hran subsystému nádrží. Hodnoty jsou uvedeny v jednotkách m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Dále jsou v tabulkách hodnoty stavu objemu v nádržích Letovice - V<sub>3</sub> a Boskovice - V<sub>6</sub> v jednotkách m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Stav objemu v m<sup>3</sup> je docíleno vynásobením, časovým intervalem trvání kroku τ = 1 měsíc (= 2 635 200 s) hodnoty objemu nádrží V<sub>3</sub> a V<sub>6</sub> uvedených v tabulkách s výsledky jednotlivých variant.

**Tab. 30** Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 1-MAX

	Časový krok $\tau$											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{9,10}$	5.73	6.85	7.5	2.8	4.16	3.47	12.12	5	6.94	2.59	3.61	5.22
$Q_{6,11}$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$Q_{1,4}$	1.51	2.92	2.14	2.02	1.94	1.94	3.16	2.62	2.28	1.97	1.69	2.1
$Q_{2,3}$	0.57	2.33	0.83	0.77	0.64	0.78	2	1.24	0.76	0.48	0.5	0.68
$Q_{3,4}$	2.28	0.62	2.54	0.1	1.31	0.1	2.68	0.1	1.9	0.1	0.88	0.68
$Q_{4,7}$	3.79	3.54	4.68	2.12	3.25	2.04	5.84	2.72	4.18	2.07	2.57	2.78
$Q_{5,6}$	0.31	1.36	0.52	0.44	0.21	0.82	1.66	0.91	0.55	0.21	0.29	0.77
$Q_{6,7}$	1.48	0.04	1.69	0.03	0.46	0.03	2.29	0.03	1.27	0.03	0.31	0.77
$Q_{7,9}$	5.27	3.58	6.37	2.15	3.71	2.07	8.13	2.75	5.45	2.1	2.88	3.55
$Q_{8,9}$	0.46	3.27	1.13	0.65	0.45	1.4	3.99	2.25	1.49	0.49	0.73	1.67
$Q_{10,fo}$	5.73	6.85	7.5	2.8	4.16	3.47	12.12	5	6.94	2.59	3.61	5.22
$V_3$	2.3	4.01	2.3	2.97	2.3	2.98	2.3	3.44	2.3	2.68	2.3	2.3
$V_6$	1.33	2.5	1.33	1.58	1.33	1.96	1.33	2.05	1.33	1.35	1.33	1.33
Hodnota kriteriální funkce = 46 770,96												

**Tab. 31** Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 1-MIN

	Časový krok $\tau$											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{9,10}$	6.56	1.9	3.16	2.18	3.95	1.7	4.54	1.96	1.82	1.32	1.54	1.87
$Q_{6,11}$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$Q_{1,4}$	1.59	1.4	1.44	1.23	1.17	1.1	1.21	0.99	0.88	0.89	1.03	1.11
$Q_{2,3}$	0.78	0.38	0.66	0.48	0.43	0.33	0.33	0.28	0.13	0.15	0.15	0.33
$Q_{3,4}$	2.49	0.1	0.1	0.1	1.65	0.1	0.56	0.1	0.31	0.1	0.2	0.1
$Q_{4,7}$	4.08	1.5	1.54	1.33	2.82	1.2	1.77	1.09	1.19	0.99	1.23	1.21
$Q_{5,6}$	0.36	0.12	0.16	0.11	0.15	0.09	0.67	0.45	0.09	0.09	0.07	0.29
$Q_{6,7}$	1.53	0.03	0.16	0.11	0.15	0.09	0.67	0.03	0.35	0.09	0.07	0.29
$Q_{7,9}$	5.61	1.53	1.7	1.44	2.97	1.29	2.44	1.12	1.54	1.08	1.3	1.5
$Q_{8,9}$	0.95	0.37	1.46	0.74	0.98	0.41	2.1	0.84	0.28	0.24	0.24	0.37
$Q_{10,fo}$	6.56	1.9	3.16	2.18	3.95	1.7	4.54	1.96	1.82	1.32	1.54	1.87
$V_3$	2.3	2.58	3.14	3.52	2.3	2.53	2.3	2.48	2.3	2.35	2.3	2.53
$V_6$	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.59	1.33	1.33	1.33	1.33
Hodnota kriteriální funkce = 46 242,39												

**Tab. 32** Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 2-MAX

	Časový krok $\tau$											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Q <sub>9,10</sub>	4.56	11.05	4.62	3.88	2.7	4.91	11.24	7.16	4.42	3.81	2.95	5.48
Q <sub>1,4</sub>	1.51	2.92	2.14	2.02	1.94	1.94	3.16	2.62	2.28	1.97	1.69	2.1
Q <sub>2,3</sub>	0.57	2.33	0.83	0.77	0.64	0.78	2	1.24	0.76	0.48	0.5	0.68
Q <sub>3,4</sub>	2.28	2.33	0.83	0.77	0.1	0.75	2.57	1.24	0.1	1.14	0.5	0.68
Q <sub>4,7</sub>	3.79	5.25	2.97	2.79	2.04	2.69	5.73	3.86	2.38	3.11	2.19	2.78
Q <sub>5,6</sub>	0.31	1.36	0.52	0.44	0.21	0.82	1.66	0.91	0.55	0.21	0.29	0.77
Q <sub>6,7</sub>	0.31	2.53	0.52	0.44	0.21	0.82	1.52	1.05	0.55	0.21	0.03	1.03
Q <sub>7,9</sub>	4.1	7.78	3.49	3.23	2.25	3.51	7.25	4.91	2.93	3.32	2.22	3.81
Q <sub>8,9</sub>	0.46	3.27	1.13	0.65	0.45	1.4	3.99	2.25	1.49	0.49	0.73	1.67
Q <sub>10,fo</sub>	4.56	11.05	4.62	3.88	2.7	4.91	11.24	7.16	4.42	3.81	2.95	5.48
V <sub>3</sub>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.84	2.87	2.3	2.3	2.96	2.3	2.3	2.3
V <sub>6</sub>	2.5	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.47	1.33	1.33	1.33	1.58	1.33
Hodnota kritériální funkce = 1 907,94												

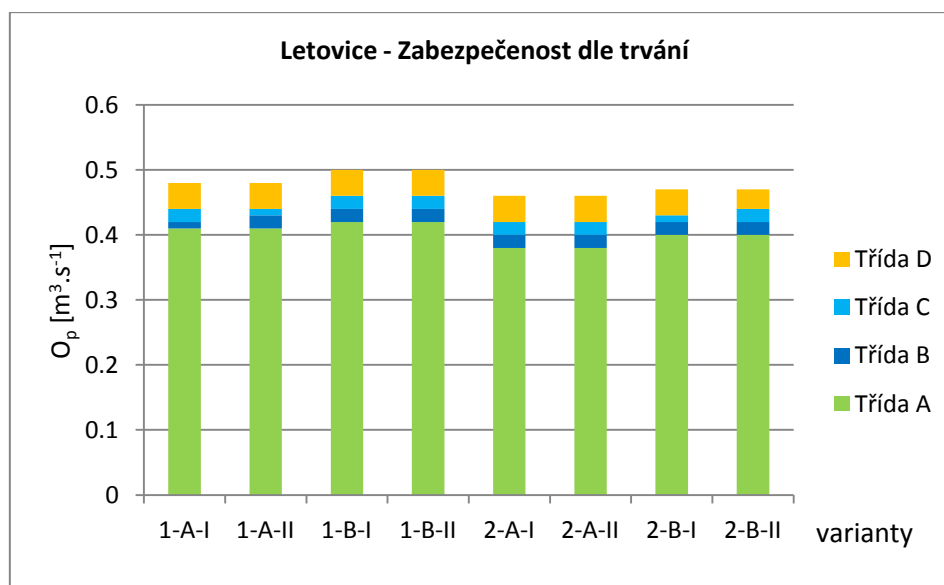
**Tab. 33** Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 2-MIN

	Časový krok $\tau$											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Q <sub>9,10</sub>	5.04	3.78	3.59	2.69	2.73	1.93	3.44	3.02	1.79	1.37	1.44	2.15
Q <sub>1,4</sub>	1.59	1.4	1.44	1.23	1.17	1.1	1.21	0.99	0.88	0.89	1.03	1.11
Q <sub>2,3</sub>	0.78	0.38	0.66	0.48	0.43	0.33	0.33	0.28	0.13	0.15	0.15	0.33
Q <sub>3,4</sub>	0.98	1.89	0.66	0.48	0.43	0.33	0.1	0.1	0.54	0.15	0.1	0.38
Q <sub>4,7</sub>	2.57	3.29	2.1	1.71	1.6	1.43	1.31	1.09	1.42	1.04	1.13	1.49
Q <sub>5,6</sub>	0.36	0.12	0.16	0.11	0.15	0.09	0.67	0.45	0.09	0.09	0.07	0.29
Q <sub>6,7</sub>	1.53	0.12	0.03	0.24	0.15	0.09	0.03	1.09	0.09	0.09	0.07	0.29
Q <sub>7,9</sub>	4.09	3.41	2.13	1.95	1.75	1.52	1.34	2.18	1.51	1.13	1.2	1.78
Q <sub>8,9</sub>	0.95	0.37	1.46	0.74	0.98	0.41	2.1	0.84	0.28	0.24	0.24	0.37
Q <sub>10,fo</sub>	5.04	3.78	3.59	2.69	2.73	1.93	3.44	3.02	1.79	1.37	1.44	2.15
V <sub>3</sub>	3.82	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.53	2.71	2.3	2.3	2.35	2.3
V <sub>6</sub>	1.33	1.33	1.45	1.33	1.33	1.33	1.96	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Hodnota kritériální funkce = 942,22												

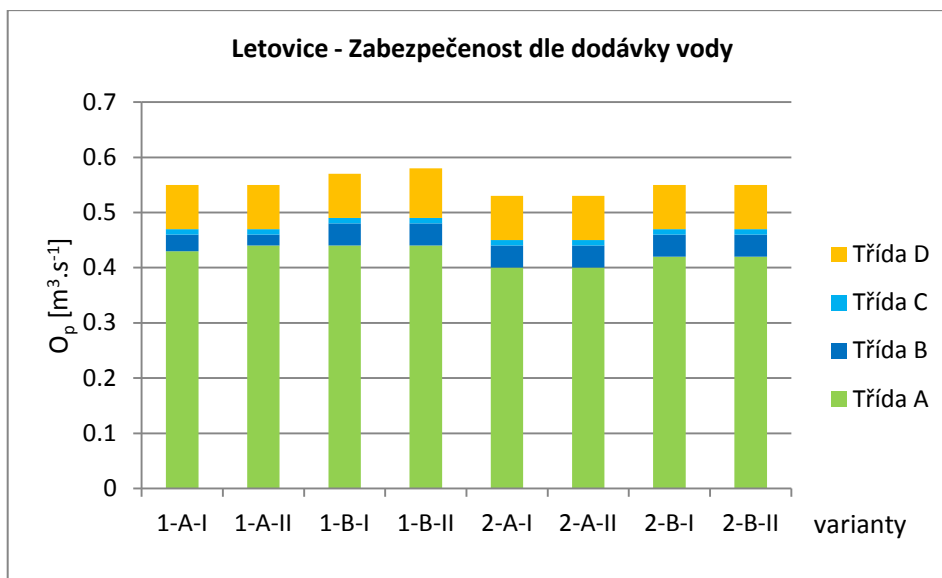
## 5. Shrnutí výsledků

### 5.1 Simulační model

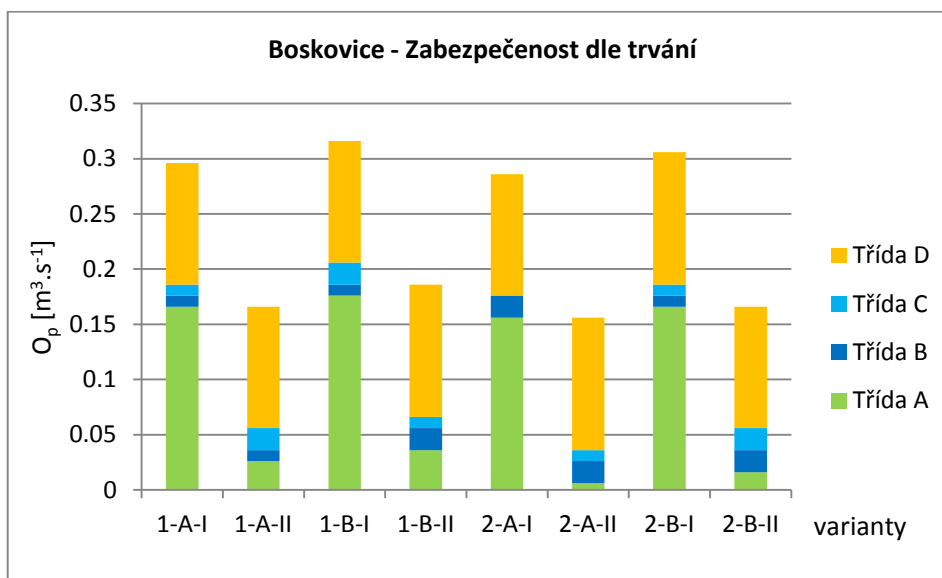
Na obr. 7 až obr. 12 je možné vidět srovnání jednotlivých 8 variant řešených v simulačním modelu, zjištěné nalepšené odtoky z nádrží, které ohraničují třídy zabezpečení A, B, C, D. Třídy zabezpečení jsou na obr. 7 až obr. 12 barevně odlišeny dle tab. 21. Na obr. 7 a obr. 8 si lze všimnout, že nalepšené odtoky z nádrže Letovice a jejich zabezpečení dle trvání a dle dodávky vody jsou si velmi blízké. Rozdíl jednotlivých variant i jednotlivých druhů zabezpečení se pohybuje v řádech setin  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na rozdíl od toho na obr. 9 a obr. 10 je možné si všimnout, že nalepšené odtoky z nádrže Boskovice a jejich zabezpečení dle trvání a dle dodávky vody jsou více odlišné. Je to způsobeno odběrem vody ve variantách s označením II. Při porovnání jednotlivých druhů zabezpečení nejsou velké rozdíly u obou nádrží. Rozdíl se pohybuje v řádech setin  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Naopak rozdíly mezi jednotlivými variantami se pohybují v řádech desetín  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Snížené nalepšené odtoky jsou logicky sníženy u variant s odběrem vody z vodárenské nádrže Boskovice. Na obr. 11 a obr. 12 si lze všimnout srovnání zabezpečení odběru vody z nádrže Boskovice při různých nalepšených odtocích. Rozdíly mezi jednotlivými zabezpečeními se opět pohybují v řádech setin  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



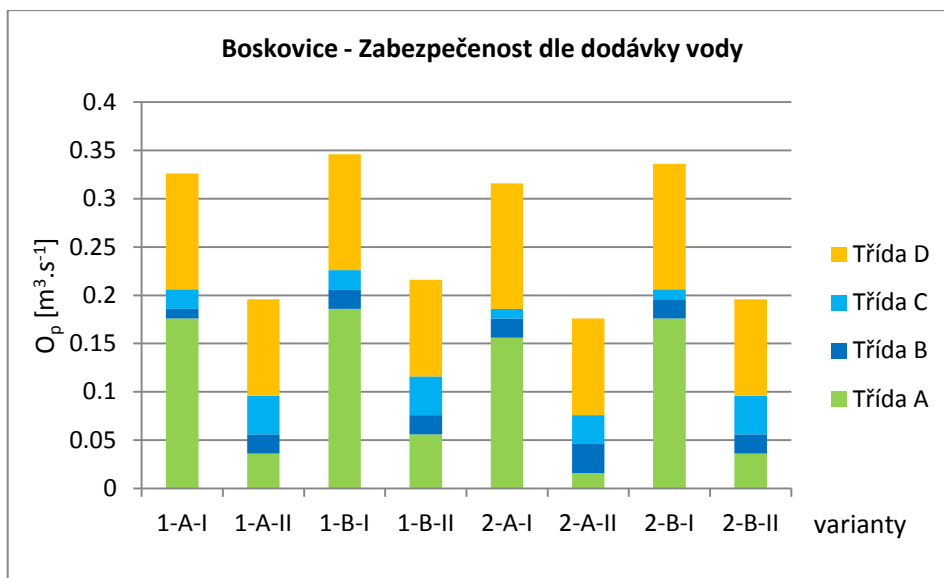
**Obr. 7** Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Letovice podle zabezpečení dle trvání pro 8 řešených variant



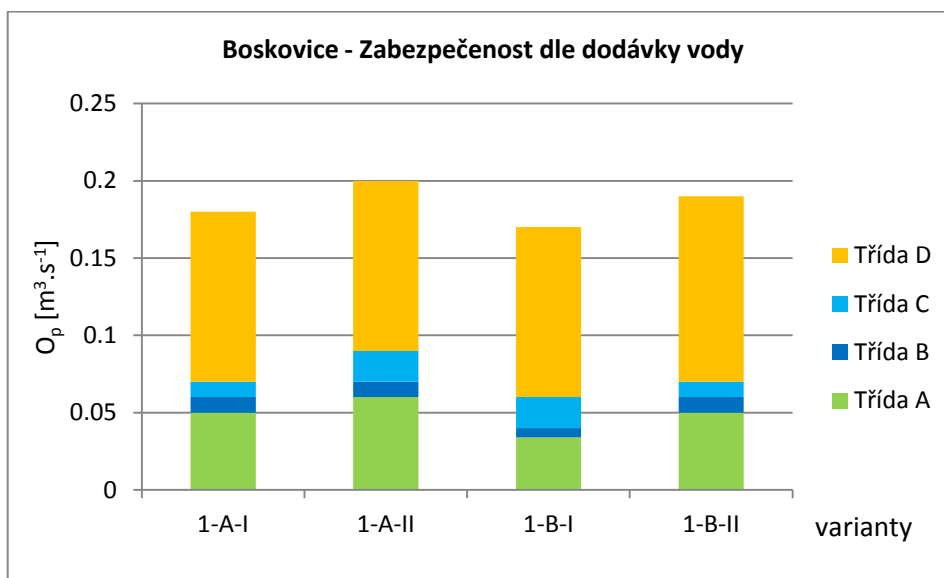
**Obr. 8** Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Letovice podle zabezpečení dle dodávky vody pro 8 řešených variant



**Obr. 9** Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Boskovice podle zabezpečení dle trvání pro 8 řešených variant

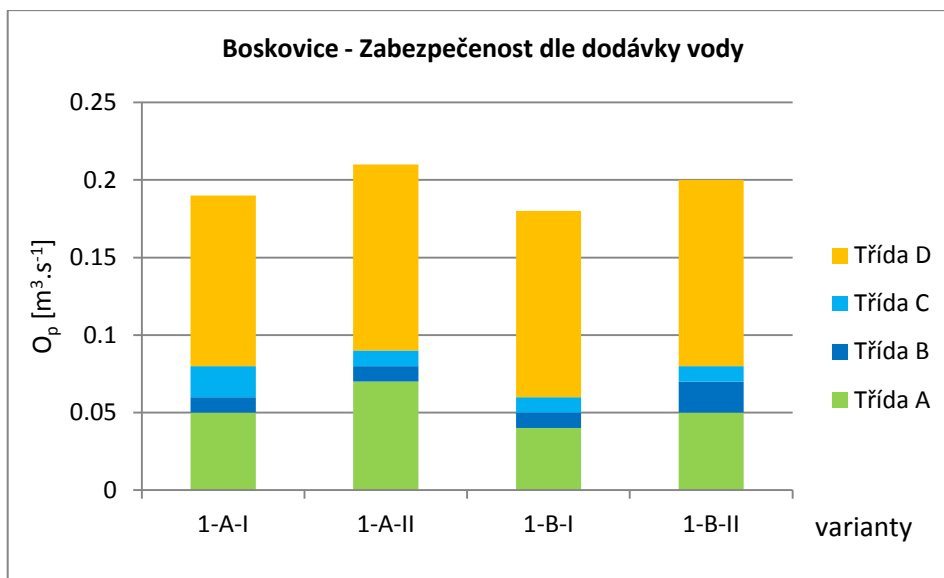


**Obr. 10** Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Boskovice podle zabezpečení dle dodávky vody pro 8 řešených variant



**Obr. 11** Srovnání zabezpečení odběru vody dle trvání z nádrže Boskovice pro 4 řešené varianty





**Obr. 12** Srovnání zabezpečení odběru vody dle dodávky vody z nádrže Boskovice pro 4 řešené varianty

## 5.2 Optimalizační model

Srovnání dosažených hodnot kritériální funkce u optimalizačního modelu si můžete všimnout v tab. 34. Jsou zde uvedeny jednotlivé varianty, které byly řešeny v optimalizačním modelu subsystému nádrží. U variant 1-MAX a 1-MIN je vidět zvýšená hodnota maximalizované kritériální funkce. Je to způsobeno kritériální funkcí odběru vody z nádrže Boskovice. Výsledky variant 1-MAX a 1-MIN v tab. 30 a tab. 31 ukazují, že je odběr vody  $O_1(n_{11})$  z nádrže Boskovice  $n_6$  dodržen v každém časovém kroku  $\tau$ . Tato kritériální funkce má ve výpočtu určenou vyšší preferenci než hledaná kritériální funkce odběru vody v uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou. Naopak výsledné hodnoty kritériální funkce u variant 2-MAX a 2-MIN jsou podstatně sníženy, protože je uvažováno pouze s jednou kritériální funkcí (odběr vody v uzávěrovém profilu). Rozdíl hodnot kritériálních funkcí mezi variantami s označením MIN a MAX nejsou u typu problematiky 1 tak rozdílné. Naopak varianta 2-MAX má hodnotu kritériální funkce dvojnásobně vyšší oproti variantě 2-MIN. Tento rozdíl je způsoben tím, že je použita jedna kritériální funkce. Co se týče maximalizovaného odtoku vody ze systému, jsou si obě výsledné hodnoty (součet dvanácti časových kroků) variant MAX velmi podobné. Stejně je tomu tak s variantami MIN.

**Tab. 34** Srovnání hodnot kritériální funkce 4 řešených variant v optimalizačním modelu

Varianty	Hodnota krit. funkce
1-MAX	46 770.92
1-MIN	46 424.39
2-MAX	1 907.92
2-MIN	942.24

## 6. Závěr

Cílem práce bylo vytvořit v programu SOMVS simulační a optimalizační model řešené vodohospodářské soustavy nádrží v povodí řeky Svitavy. Oba modely byly automatizovaně sestaveny v programu SOMVS. K sestavení modelů bylo zapotřebí shromáždit potřebná data zadávaná do programu. Funkčnost modelů byla ověřena v reálné průtokové řadě průměrných měsíčních průtoků.

V simulačním modelu byla řešena simulace toku vody vybraným subsystémem nádrží. V závislosti změny nalepšeného odtoku  $O_p$  byly nalezeny zabezpečení odtoku vody z nádrže. Bylo vytvořeno 8 variant a pro každou variantu byl proveden výpočet a vyhodnocení. Řešení bylo provedeno v reálné průtokové řadě dlouhé 17 let, která byla vybrána z dat poskytnutých ČHMÚ. Získané údaje o nalepšených odtocích a jejich zabezpečenostech jsou logické a odpovídají předpokladům, že při zavedení ztrát vody z nádrží do výpočtů dojde k snížení odtoku vody z nádrží. Při zavedení vlivu mezipovodí do výpočtů se mírně zvýší nalepšený odtok z nádrží a při odběru vody z nádrže Boskovice dojde k významnějším změnám nalepšeného odtoku a jejich zabezpečení. Největších rozdílů v nalepšeném odtoku v závislosti na zabezpečení došlo při porovnání hodnot u nádrže Boskovice. Je to ovlivněno odběrem vody pro vodárenské účely. Rozdíl jednotlivých variant se pohybuje v řádech desetin  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

V optimalizačním modelu byla hledána maximalizovaná kriteriální funkce pro odběr vody v uzávěrovém profilu Bílovice nad Svitavou. V optimalizačním modelu byly řešeny 4 varianty. Výpočet byl proveden na reálné průtokové řadě, která byla dlouhá 1 rok. Průtoková řada byla vybrána z reálné průtokové řady použité v simulačním modelu. Byly vybrány roky, kde dochází k maximálnímu a minimálnímu přítoku vody do subsystému nádrží a na tyto hodnoty byly provedeny výpočty. Dosažené výsledky jsou logické a odpovídají předpokladu, že pokud je uvažováno s odběrem vody z nádrže Boskovice, jsou hodnoty kriteriální funkce mnohonásobně vyšší.

Do budoucna, například v rámci jiné bakalářské práce mohou být výpočty provedeny na umělé průtokové řadě. V simulačním modelu by mohlo být uvažováno se ztrátou vody z nádrží pomocí přesného výpočtu. Také by bylo možné vyřešit problematiku průtokové řady a prodloužit časově synchronní průtokovou řadu a výpočty na této nové reálné průtokové řadě opakovat.

Co se týče optimalizačního modelu, mohlo by být do budoucna uvažováno s rozšířením variant o další problematiku a to zavedení ztráty vody z nádrží. Mohla by být také vybrána jiná průtoková řada a jinak upravena kriteriální funkce.

## Seznam použitých zdrojů

STARÝ, Miloš. Nádrže a vodohospodářské soustavy. 1. vyd. Brno: VUT, 1986, 165 s.

TNV 75 0910 Dovolené průsaky uzávěrů vodních děl. Praha: Hydroprojekt CZ, 2004, 8 s.

Povodí Moravy, s. p. [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz>

PETR, Michal. *GIS povodí Svitavy: analýza environmentálních rizik*. Brno, 2006. 87 l., 12 l. příl. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/39648/prif\\_m/DP.pdf](http://is.muni.cz/th/39648/prif_m/DP.pdf). Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA, Fakulta přírodovědecká, Ústav geografický. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr DOBROVOLNÝ, CSc.

MENŠÍK, Pavel. Automatizace řešení zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Brno, 2012. 180 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Školitel prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

MENŠÍK, P.; STARÝ, M.: SOMVS – Simulační a Optimalizační Model Vodohospodářské Soustavy. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software).

MICHALOVÁ, Lucie. *Řízení vybrané vodohospodářské soustavy pomocí optimalizačního modelu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph. D.

ČECHOVÁ, Martina. *Analýza vybraných vlivů na vodohospodářské řešení zásobní funkce soustavy nádrží*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph. D.

Povodí Moravy, s. p. Manipulační řád pro vodní dílo Letovice na toku Křetínky v km 2,923. Brno 2009

Povodí Moravy, s. p. Manipulační řád pro vodní dílo Boskovice na řece Bělá v km 7,400. Brno 2009

Zelinka, I. Umělá inteligence v problémech globální optimalizace BEN, 2002, 232 s. ISBN 80-7300-069-5.

TJ Sokol Letovice: Jachetní oddíl. [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.kretinka.net/2006/2006.htm>

ČESKO. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN 75 2405 Vodohospodářská řešení vodních nádrží*. Praha: Český normalizační institut, 2004, 20 s.

## Seznam obrázků a tabulek

### Obrázky:

<b>Obr. 1</b> Povodí řeky Svitavy .....	2
<b>Obr. 2</b> Přehrada Letovice .....	3
<b>Obr. 3</b> Přehrada Boskovice.....	5
<b>Obr. 4</b> Orientovaný graf, převzato (Menšík, 2012). .....	9
<b>Obr. 5</b> Úhrn ročního výparu v závislosti na nadmořské výšce a stupni zabezpečení.....	16
<b>Obr. 6</b> Výsledná schematizace MP řešeného subsystému nádrží v povodí řeky Svitavy.....	25
<b>Obr. 7</b> Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Letovice podle zabezpečení dle trvání pro 8 řešených variant .....	46
<b>Obr. 8</b> Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Letovice podle zabezpečení dle dodávky vody pro 8 řešených variant .....	47
<b>Obr. 9</b> Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Boskovice podle zabezpečení dle trvání pro 8 řešených variant .....	47
<b>Obr. 10</b> Srovnání nalepšených odtoků z nádrže Boskovice podle zabezpečení dle dodávky vody pro 8 řešených variant .....	48
<b>Obr. 11</b> Srovnání zabezpečení odběru vody dle trvání z nádrže Boskovice pro 4 řešené varianty .	48
<b>Obr. 12</b> Srovnání zabezpečení odběru vody dle dodávky vody z nádrže Boskovice pro 4 řešené varianty.....	49

## Tabulky:

<b>Tab. 1</b> VD Letovice – prostor stálého nadržení .....	3
<b>Tab. 2</b> VD Letovice – zásobní prostor .....	3
<b>Tab. 3</b> VD Letovice – retenční neovladatelný prostor .....	4
<b>Tab. 4</b> VD Letovice – celkový prostor .....	4
<b>Tab. 5</b> VD Boskovice – prostor stálého nadržení.....	5
<b>Tab. 6</b> VD Boskovice – zásobní prostor .....	5
<b>Tab. 7</b> VD Boskovice – retenční neovladatelný prostor .....	6
<b>Tab. 8</b> VD Boskovice – celkový prostor .....	6
<b>Tab. 9</b> Procentuální rozdělení ročního výparu na každý měsíc (%).....	16
<b>Tab. 10</b> Průsaky na významných přehradách v České republice.....	17
<b>Tab. 11</b> Přehled měření v měrných profilech.....	23
<b>Tab. 12</b> Kódová čísla definující subsystém zásobení vodou a délky hran grafu.....	28
<b>Tab. 13</b> Minimální a neškodné průtoky v hranách grafu pod jednotlivými nádržemi .....	28
<b>Tab. 14</b> Maximální, minimální a počáteční objemy nádrží .....	29
<b>Tab. 15</b> Hodnoty pro stanovení ztrát vody výparem z vodní hladiny řešených nádrží.....	29
<b>Tab. 16</b> Hodnoty průsaku netěsností uzávěrů výpustních objektů.....	30
<b>Tab. 17</b> Průměrný měsíční odběr z nádrže Boskovice v $m^3 \cdot s^{-1}$ .....	30
<b>Tab. 18</b> Hodnoty neovlivněných průtoků řešeného subsystému nádrží.....	31
<b>Tab. 19</b> Parametry diferenciální evoluce .....	33
<b>Tab. 20</b> Body lineární kritériální funkce optimalizačního modelu .....	34
<b>Tab. 21</b> Třídy zabezpečení .....	35
<b>Tab. 22</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-A-I .....	36
<b>Tab. 23</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-A-II .....	37
<b>Tab. 24</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-B-I.....	38
<b>Tab. 25</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 1-B-II.....	39
<b>Tab. 26</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-A-I .....	40
<b>Tab. 27</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-A-II .....	41
<b>Tab. 28</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-B-I.....	42
<b>Tab. 29</b> Výsledné hodnoty výpočtu simulačního modelu varianty 2-B-II.....	43
<b>Tab. 30</b> Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 1-MAX.....	44
<b>Tab. 31</b> Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 1-MIN.....	44
<b>Tab. 32</b> Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 2-MAX.....	45
<b>Tab. 33</b> Výsledné hodnoty optimalizačního modelu varianty 2-MIN.....	45
<b>Tab. 34</b> Srovnání hodnot kritériální funkce 4 řešených variant v optimalizačním modelu .....	49