VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

REŠERŠE A POROVNÁNÍ METOD PRO VÝPOČET ZÁSOBNÍHO OBJEMU NÁDRŽE

SEARCH AND COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATION OF RESERVOIR STORAGE YIELD ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — VERONIKA MICHÁLKOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Veronika Michálková
Název	Rešerše a porovnání metod pro výpočet zásobního objemu nádrže
Vedoucí práce	doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D. Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

VOTRUBA L., BROŽA V., Water Management and Reservoirs, Prague, 1989
STARÝ M., Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01), VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2006.
STARÝ M., Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02), VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2006.
T. A. McMahon, Adebayo J. Adeloye, Water Resources Yield, Water Resources Publication, 2005, ISBN: 1887201386

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době globální oteplování a s ním spojená změna klimatu stále častěji zasahují do lidských životů a odvětví spojených s jejím běžným chodem. Jedním z ohrožených sektorů klimatickou změnou je vodní hospodářství a sním spojené hospodaření s vodními zdroji. V blízké budoucnosti budou povrchové vodní zdroje stále více pod tlakem hydrologických extrémů povodní a sucha. Práce má za cíl provést rešerší a početní porovnání metod výpočtu zásobního objemu nádrže, který jako povrchový vodní zdroj je významným prvkem v boji proti nedostatku vody. Aplikace vybraných metod bude provedena na nádrži Vír I v povodí řeky Svratky.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

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

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Neustále se zvětšující hrozba klimatické změny dostává do popředí téma vodních zdrojů, podzemních i povrchových. Hydrologické extrémy v podobě povodní a sucha zde byly vždy. Jejich intenzita se však zvýšila a mají mnohem větší rozsah a dopady na život. Na jedné straně je třeba zadržet a akumulovat vodu pro další hospodárné využití, na druhé transformovat povodňové vlně a snažit se zabránit ničivým dopadům záplav. Vzhledem k těmto skutečnostem je cílem práce vytvoření uceleného přehledu metod výpočtů velikosti zásobního objemu nádrže, který je z pohledu boje se suchem jedním z mnoha nástrojů pro efektivní zmírnění jeho následků. V textu jsou zahrnuty metody z pohledu zahraničního i českého. Bylo aplikovaných pět metod na přítoku vodní nádrže Vír prezentované průtokovou řadou. Dvě z vybraných jsou sekvenční špičkový algoritmus, který využívá postupné bilance přítoku a odtoku z nádrže. Jsou používány v zahraničí. Další metoda je přímé řešení velikosti zásobního objemu nádrže, které bylo převzato ze studijních materiálů na ČVUT Praha. Z této oblasti je také postupně bilanční metoda a nakonec je spočtena úloha typu A.1, která se objevuje ve studijních materiálech Fakulty stavební VUT Brno. Praktická aplikace metod poskytla také srovnání výsledků výpočtů a jejich odlišnosti.

Abstract

The ever-increasing threat of climate change is bringing the issue of water resources, both groundwater and surface water, to the fore. Hydrological extremes in the form of floods and droughts have always been there. However, their intensity has increased and they have a much greater scale and impact on life. On the one hand there is a need to retain and store water for further economic use, on the other to transform flood waves and try to prevent the devastating effects of floods. In view of these facts, the aim of this paper is to develop a comprehensive overview of methods for calculating the size of reservoir storage volume, which is one of many tools for effective mitigation in the perspective of combating drought. The text includes methods from both foreign and Czech perspectives. Five methods were applied on the inflow of the Vír reservoir presented by a flow series. Two of the selected ones are sequent peak algorithm which uses sequential balance of inflow and outflow from the reservoir. They are used abroad. The other method is a direct solution to the size of the reservoir storage volume size, which was taken from the study materials at CTU Prague. Also from this area is the progressive balance method and finally the problem of type A.1 is calculated, which appears in the study materials of the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology. The practical application of the methods also provided a comparison of the results of the calculations and their differences.

Klíčová slova

Nádrž, zásobní objem nádrže, základní rovnice nádrže, sekvenční špičkový algoritmus, kumulativní křivka.

Keywords

Reservoir, storage capacity, water balance, sequent peak alogorithm, the mass curve procedure.

Citace

MICHÁLKOVÁ, VERONIKA. *Rešerše a porovnání metod pro výpočet zásobního objemu nádrže.* Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

Rešerše a porovnání metod pro výpočet zásobního objemu nádrže

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana doc. Ing. Daniela Martona, Ph.D. Uvedla jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpala.

.....
VERONIKA MICHÁLKOVÁ
26. května 2022

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. především za jeho odborné rady, trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při vypracovávání bakalářské práce. Dále chci poděkovat své rodině a nejbližším za veškerou podporu ve fázích paniky i mimo ni.

Obsah

1 Úvod **4**

2 Současný stav poznání - rešerše **7**

2.1 Storage-yield-performace . . . 8

2.1.1 Ripplova metoda . . . 9

2.2 On-stream storage - rychlé metody . . . 10

2.2.1 Dincerova metoda . . . 10

2.2.2 Metoda Gould gamma . . . 11

2.2.3 Metoda Vogela & Stedingera . . . 11

2.2.4 Bayazit & Bulu . . . 12

2.3 On-stream storage - detailní metody . . . 12

2.3.1 Kumulativní křivka . . . 12

2.3.2 Sekvenční špičkový algoritmus . . . 14

2.3.3 Leleho sekvenční špičkový algoritmus . . . 15

2.3.4 Montaseriho sekvenční špičkový algoritmus . . . 17

2.3.5 Simulace založená na zásobním objemu - Analýza chování . . . 18

2.3.6 Gouldova matice pravděpodobnosti přechodu (TPM) . . . 18

2.4 Optimalizační metody . . . 19

2.5 Analýza výnosu zásobního objemu . . . 20

2.6 Simulační metody . . . 22

2.6.1 Úloha zásobního objemu A.1 . . . 23

2.6.2 Úloha zásobního objemu B.1 . . . 23

2.6.3 Zásobní objem pro víceleté řízení odtoku . . . 24

2.6.4 Umělé průtokové řady . . . 24

2.6.5 Roční řízení odtoku . . . 25

2.7 Statistické metody . . . 26

2.7.1 Víceleté řízení odtoku . . . 26

2.7.2 Metoda Krického a Menkela . . . 28

2.7.3 Moranova metoda . . . 28

2.7.4 Roční (sezónní) řízení odtoku . . . 31

2.7.5 Klemešova metoda . . . 31

2.7.6 Andrejanovova metoda . . . 32

2.8 Ztráty vody výparem . . . 33

3 Metody výpočtu **35**

3.1 Zahraničí . . . 35

3.1.1 Sekvenční špičkový algoritmus dle McMahona & Adeloye (2005) . . . 35

3.1.2 Sekvenční špičkový algoritmus dle Jain (2003) . . . 36

3.2 Česká republika 37
3.2.1 Úloha typu A.1 dle Starého (2006) 37
3.2.2 Přímé řešení dle Patery (2002) 39
3.2.3 Postupně bilanční metoda dle Brožy (1993) 40

4 Praktická aplikace **42**
4.1 Obecné informace 42
4.2 Data použitá ve výpočtech 45

5 Shrnutí a srovnání **51**

6 Závěr **53**

Seznam obrázků

1.1 Národní žebříček nedostatku vody (Kadeřábková, 2019) 5
1.2 Odchylka sucha od obvyklého stavu v období 1961 - 2010 (Intersucho, 2022) 6

2.1 Schéma rozdělení funkčních prostorů v nádrži 7
2.2 Rozdělení S-Y-P technik (McMahon & Adeloye, 2005) 9
2.3 Kumulativní křivka (Reservoir capacity estimation, 1998) 13
2.4 Schéma stanovení zásobního objemu nádrže pro $P = 100\%$ (Starý, 2006) . . 24
2.5 Nacházelovy diagramy - ukázka 30

3.1 Podmínka výpočtu - McMahon & Adeloye (2005) 36
3.2 Podmínka výpočtu - Jain (2003) 37
3.3 Podmínka výpočtu - Starý (2006) 38
3.4 Podmínka výpočtu - Patera (2002) 40
3.5 Podmínka výpočtu - Broža (1993) 41

4.1 Mapa řeky a povodí Svratky, VN Vír a hlásného profilu Dalečín 43
4.2 Mapa VD Vír 44
4.3 VN Vír I, obec Vír a VN Vír II 44
4.4 Hráz Vír I (Okolo Vírské přehrady, nedatováno) 45
4.5 Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Boržy (1993) 46
4.6 Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Patery (2002) 47
4.7 Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Starého (2006) 48
4.8 Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle McMahona & Adeloye (2005) 49
4.9 Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Jaina (2003) . 50

5.1 Srovnání výsledků různých metod výpočtu V_z 51

Kapitola 1

Úvod

V momentální době neustále se zvětšující hrozby klimatické změny, ať už z jakýchkoliv důvodů, se do popředí dostává téma podzemních i povrchových vodních zdrojů. Hydrologické extrémy v podobě povodní a sucha zde byly vždy, avšak jejich intenzita se zvyšuje a mají mnohem větší rozsah a dopady na život.

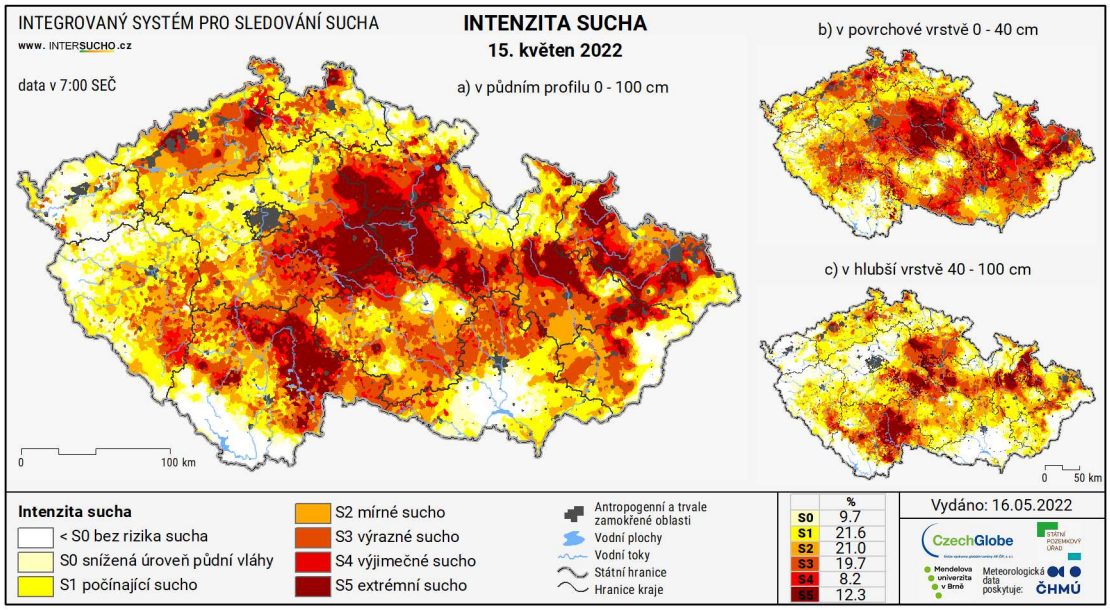
V posledních letech nárazově přichází srážky vytrvalejší a intenzivnější než kdy dřív. v Indii roku 2019 "Letecké záběry postižených oblastí ukazují rozvodněné řeky a zaplavená pole i vesnice. Zničena byla velká část úrody. Voda poškodila silnice a strhla mosty. Místní úřady nařídily zavřít školy."(Economia, 2019). Minulý rok "Americká Národní meteorologická služba (NWS) v New Yorku naměřila jedny z nejintenzivnějších srážek za celou dobu svých záznamů. v Central Parku na Manhattanu napršelo za hodinu 80 milimetrů srážek. Ještě o něco silnější déšť hlásilo letiště Newark."(Economia, 2021). Jihoafrickou republiku tohoto roku postihly silné deště a záplavy, v důsledku čehož má stovky obětí. Brazílie je rovněž zasažena záplavami s desítkami obětí. Ani Evropa se nevyhla silným dešťům a povodním, včetně České republiky. v roce 2013 "Českou republiku postihly po vytrvalých deštích záplavy. Zasáhly zejména Jihočeský, Plzeňský, Ústecký, Liberecký, Královéhradecký, Středočeský kraj a Prahu. Škody dosáhly 15 miliard korun."(MAFRA, 2021).

Na druhé straně stojí extrémní sucha. "Podle dat Světového institutu zdrojů (WRI) ze srpna 2019 čelí extrémnímu nedostatku vody asi čtvrtina světové populace, přičemž nejvíc trpí Střední východ a severní Afrika. (...) Krize sucha trápí v současnosti sedmnáct států i několik desítek milionových měst včetně Sao Paula v Brazílii, Čennaie v Indii a Kapského města v Jihoafrické republice. Poslední zmiňované mimochodem už v roce 2018 díky účelným opatřením a později i vydatným dešťům jen o vlásek uniklo takzvanému Dni Nula – tedy dni, kdy úrovně hladin hlavních nádrží zásobujících město poklesnou pod úroveň 13,5 %, což by znamenalo, že z většiny městských kohoutků přestane téct voda."(Kadeřábková, 2019). i nad americkým kontinentem se projevují nedostatky srážek. "Jihozápadní oblasti Spojených států a přilehlá území v Mexiku čelí od počátku nového tisíciletí rozsáhlému a úmornému megasuchu. (...) Kromě zmíněného prakticky neustálého nedostatku vody jde o rozsáhlé ztráty úrody a dobytka, častější smrtící vlny veder, srážky způsobující záplavy a superbouře."(Mihulka, 2022). Studie končící roku 2018 zjistila, že "Vlny veder v minulých letech měly podle vědců devastující dopady v podobě tisíců předčasných úmrtí, zničené úrody či lesních požárů. Nízké hladiny řek místy zastavily lodní dopravu i chlazení jaderných elektráren. Hlavní příčinou jsou vysoké teploty, jež byly v posledních letech zaznamenány po celé Evropě. Klimatologové předpovídají v budoucnu ještě extrémnější a častější vedra a sucha."(Český rozhlas, 2021).

Obrázek 1.1: Národní žebříček nedostatku vody (Kadeřábková, 2019)

Obrázek 1.1 ukazuje země s nejhorším nedostatkem vody - zhora: extrémně vysoký, vysoký a středně vysoký.

Také v České republice je nedostatek vody. "Deficit srážek se postupně prohlubuje od roku 2015. Ani srážkově normální periody, které se místy objevují, nestíhají vrátit stav oběhu vody do normálu."(ČHMÚ, 2020). Na obrázku 1.2 lze vidět intenzitu sucha v ČR ke dni 15. 5. 2022. Na popud Ministerstva zemědělství podniky zahájily řešení technicko-ekonomické studie pro budování údolních nádrží, přičemž do dalších úvah o výstavbě směřují například VD Vlachovice a VD Skalička. Na některých nádržích se muselo přistoupit k mimořádné manipulaci, a to například na vodní nádrži Vír nebo na Vranovské nádrži roku 2017 a 2018 spočívající v žádosti o omezení průměrných denních průtoků (Viskot, 2019).



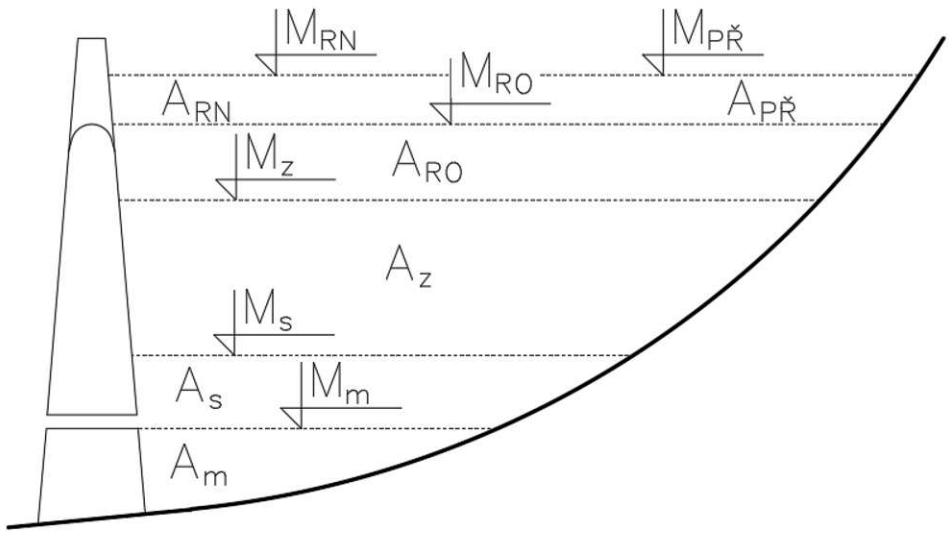
Obrázek 1.2: Odchylka sucha od obvyklého stavu v období 1961 - 2010 (Intersucho, 2022)

Z těchto pohledů jsou vodní nádrže nezbytnou součástí fungování společnosti. Také správné vodohospodářské řešení nádrží je velice důležité. Cílem práce je tak vytvoření uceleného přehledu metod výpočtů velikosti zásobního objemu nádrže. Jsou zde zahrnuty metody z pohledu zahraničního i českého. Dále jsou některé z postupů aplikovány v průtokové řadě vodní nádrže Vír.

Kapitola 2

Současný stav poznání - rešerše

Objem nádrže je koncepčně rozdělen do několika prostorů založených na účelu který má nádrž splňovat. Obr. 2.1 ukazuje schéma rozdělení funkčních prostorů v nádrži. "A"značí objem daného prostoru a "M" jeho výšku hladiny. Prostor stálého nadržení (s indexy s), se nachází ve spodní části nádrže. Slouží k udržení stálé hladiny v nádrži a stabilizaci vlastností odebírané vody. Jeho součástí je mrtvý prostor (s indexy m), který zabírá místo pod úrovní spodních výpustí. Soustřeďují se zde sedimenty a nelze jej gravitačně vyprázdnit. Nad prostorem stálého nadržení leží zásobní prostor (s indexy z). Zajišťuje odběry z nádrže a stálý odtok do toku. Hlavní účel zásobního prostoru u vodárenských nádrží je zásobování surovou vodou pro pitné účely, zásobování průmyslu a zemědělství. u ostatních nádrží je to pak plavba, rekreace, hydroenergetické využití nebo chov ryb. k transformaci povodňových vln a zachytávání povodní slouží retenční prostor. Je navržen tak, aby se v toku nepřekročil tzv. neškodný odtok. Dále se dělí na retenční prostor ovladatelný (s indexy RO)a neovladatelný (s indexy RN).



Obrázek 2.1: Schéma rozdělení funkčních prostorů v nádrži

Text bude zaměřen na detailní rešerši o metodách výpočtu velikosti zásobního objemu.

Zahraničí

2.1 Storage-yield-performace

McMahon & Adeloy (2005) shrnují metody pro výpočet zásobního objemu nádrže, tzv. S-Y-P (storage-yield-performance = úložistě-výnos-výkon). Základní rovnici nádrže popisují jako:

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - Y_t \tag{2.1}$$

kde je Z_t a Z_{t+1} naplnění zásobního objemu v čase t a t_1, Q_t je přítok do nádrže a Y_t odtok z nádrže (bez uvažování ztrát vody). S-Y-P dělí do tří hlavních skupin (obr. 2.2):

a. Metody kritického období

b. Metody Moranova a pravděpodobnostní matice

c. Metody založené na generování stochastických dat

Českými ekvivalenty veličin jsou: $Z_t = V_z$, $Q_t = Q_{m,i}$ a $Y_t = O_p$.

Metody kritického období jsou založeny na rovnici kontinuity, kde se požadovaný objem rovná maximálnímu rozdílu mezi odtokem (odběrem) z nádrže a přítokem do nádrže během kritické periody. Metody spadající do této kategorie se potýkají se spoustou potíží. Například v těch, jež používají nejmenší zaznamenanou sekvenci toku jako základ požadovaného objemu, objem bude funkcí časového záznamu. v některých případech musí být odtok považován za konstantní. u většiny metod je předpoklad plné nádrže na začátku nejhorší kritické periody. Je tak navržen zásobní objem pro tuto kritickou periodu a nejsou k dispozici žádné informace týkající se schopnosti nádrže splnit požadavky na množství odebírané vody, pokud se objeví nízké průtoky, které jsou častější než bývaly. Navíc metody používající objemovou čáru (Rippl 1883) mají zkreslený počáteční odhad.

Metody Moranova a pravděpodobnostní matice zahrnují Gouldovu matici pravděpodobnosti přechodu, která je jedinou obecně použitelnou metodou. Všechny ostatní jsou buď analyticky nezvladatelné nebo jsou založeny na nereálných předpokladech.

Metody založené na generování stochastických dat se zabývají metodami pro výpočet zásobního objemu na základě umělých průtokových řad.

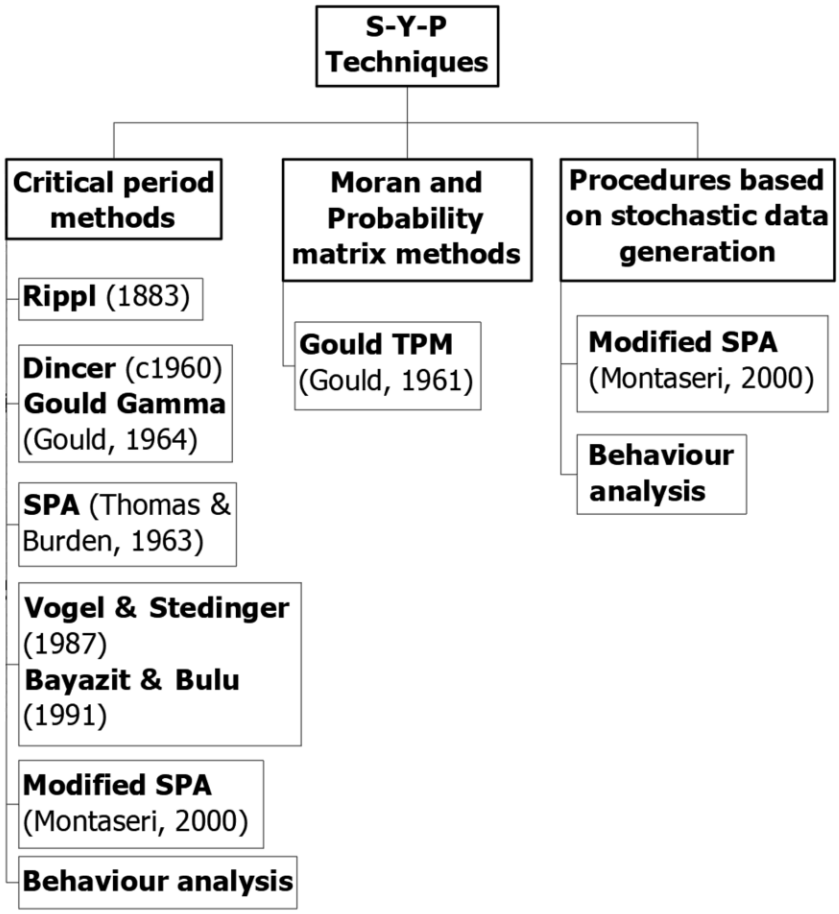
McMahon & Adeloye (2005) okrajově popisují metody pro výpočet zásobního objemu nádrže mimo tok, tzv. off stream storage. Ty se používají pro čerpání vody z toku v období s vysokými průtoky. Poté může být voda použita pro pohánění vodní elektrárny nebo jako vyrovnávací nádrž či zásobárna vody v málovodných obdobích. v knize se však rozvádí především metody pro nádrže umístěné na toku - on-stream storage. Objemy pro tyto nádrže se počítají na základě průtokových dat. Dělí je zde na rychlé a detailní metody, jak je zobrazeno na obr. 2. v první skupině (quick procedures) jsou zahrnuty:

- Dincerova metoda
- metoda Gould Gamma

- Vogel and Stadinger
- Bayazit and Bulu.

Druhá skupina (detailed procedures) rozvádí:

- Kumulativní křivka
- Sekvenční špičkový algoritmus (SPA)
- Modifikovaný SPA - Lele, Montaseri
- Gouldova matice pravděpodobnosti přechodu



Obrázek 2.2: Rozdělení S-Y-P technik (McMahon & Adeloye, 2005)

2.1.1 Ripplova metoda

Rippl (1883) jako první rozvedl téma výpočtu zásobního objemu nádrže. Sestavil rovnici

$$Z = \frac{1,000}{0,198.\sqrt{R}} \tag{2.2}$$

kde R vyjadřuje průměrný úhrn srážek v milimetrech během tří suchých let a Z počet dní, po které má být objem dostupný. Potřebné množství uložené vody na jeden den popisuje rovnicí

$$T = B + C + V - D \tag{2.3}$$

B vyjadřuje požadavky na odběr do spotřebiště, C odtok do toku, v ztráty z hladiny evaporací a D přítok za suchého počasí, vše za 24 hodin.

2.2 On-stream storage - rychlé metody

2.2.1 Dincerova metoda

Dincerova metoda (McMahon & Mein, 1978) uvažuje s řadou nezávislých ročních přítoků se střední hodnotou $\overline{x}$ a směrodatnou odchylkou s.

n-letá střední hodnota:

$$\overline{x}_n = n\overline{x} \tag{2.4}$$

n-letá směrodatná odchylka:

$$s_n = (\sum^{n} s^2)^{\frac{1}{2}} \tag{2.5}$$

V důsledku principu centrálního limitu se s rostoucím n se po sobě jdoucí roční průtoky blíží normálnímu rozdělení. Proto je nižší p-percentil toku dán vztahem:

$$q_{n,p} = n\overline{x} - z_p n \frac{1}{2} s \tag{2.6}$$

kde $q_{n,p}$ značí n-letý průtok s pravděpodobností výskytu p%, tj. po dobu p% času je n-letý průtok $\leq q_{n,p}$ a z_p standardizovaná normální variace při p%.
Během kritické periody se požadovaný objem rovná rozdílu odtoku s přítokem:

$$C_{n,p} = D_n - q_{n,p} \tag{2.7}$$

$C_{n,p}$ značí prázdnění původně plné nádrže na konci n-letého období, během kterého je pravděpodobnost výskytu n-letého průtoku p%, D_n pak konstantní požadavek na odtok z nádrže za n let = $Dn\overline{x}$, kde D je konstantní odtok jako podíl průměrného ročního průtoku. Substitucí rce (2.7) dostaneme:

$$C_{n,p} = Dn\overline{x} - n\overline{x} + z_p n^{\frac{1}{2}} s = n\overline{x}\,(D-1) + z_p n^{\frac{1}{2}} s. \tag{2.8}$$

K získání délky kritického období a maximálního požadovaného objemu je třeba diferencovat rovnici (2.8) s ohledem na n a porovnat vše k nule.

$$CP = \frac{z_p^2}{4(1-D)^2}\, C_v^2 \tag{2.9}$$

z čehož plyne:

$$\tau = \frac{C}{\overline{x}} = \frac{z_p^2}{4(1-D)}\, C_v^2 \tag{2.10}$$

kde
CP = délka kritické periody v letech
C_v = roční koeficient variace
C = maximální požadovaný objem v jednotkách objemu
τ = maximální požadovaný objem vyjádřený jako poměrný střední roční průtok.

Metoda předpokládá původně plnou nádrž a pouze jednu poruchu během kritické periody. Dále délku kritické periody dostatečně dlouhou, aby n-leté průtoky směřovaly k normálnímu rozdělení a také rovnoměrnost odběru. Metoda je založena na ročních průměrných datech, tudíž sezónní potřeby nejsou brány v úvahu.

2.2.2 Metoda Gould gamma

McMahon & Adeloye (2005) dále zmiňují Gouldovu manuální korekci rovnice (2.10) z normálního na gamma rozdělení. Nicméně přímá přibližná hodnota byla uvažována Vogel & McMahonem (1996) nahrazením z_p standardizovanou náhodnou gamma veličinou w_q, která je vyjádřená následovně:

$$w_q = \frac{2}{\gamma}\,[\,\{1 - [\frac{\gamma}{6}]^2 + [\frac{z_q\gamma}{6}]\,\}^3 - 1] \tag{2.11}$$

s $\gamma = 2C_v$ pokud přítoky respektují gamma rozdělení. $|\gamma| \leq 3$.

Potíže u Dincerovy a Gould Gamma metod nastávají při auto-korelaci přítoků a korekci výparu z nádrže (McMahon & Adeloye, 2005).

Metody úspěšně pracují s normálním a gamma rozdělením ročních průtoků. Hlavním limitem těchto dvou metod je jejich funkčnost pouze u víceletého řízení nádrží. Jelikož se řadí mezi metody kritického období, předpokládají plnou nádrž na začátku kritické periody. Pro předběžný návrh zásobního objemu tato skutečnost není příliš důležitá.

2.2.3 Metoda Vogela & Stedingera

Vogel & Stedinger uvažují toky s log-normálním rozdělením přítoku, tudíž přidávají parametr roční koeficient variace $0,1 \leq C_v \leq 0,5$. Vzhledem k tomu, že zásobní objem lze dle nich dobře přiblížit 3-parametrickým log-normálním rozdělením, p-tý kvantil standardizovaného zásobního objemu je roven:

$$\frac{S_p}{\sigma} = \tau_s + exp\,(\mu_l + z_p\sigma_l) \tag{2.12}$$

kde:

$$\mu_l = ln[\frac{\mu_s - \tau_s}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_s^2}{(\mu_s - \tau_s)^2}}}] \tag{2.13}$$

$$\sigma_l^2 = ln[1 + \frac{\sigma_s^2}{(\mu_s - \tau_s)^2}] \tag{2.14}$$

μ_s značí střední hodnotu, σ_s rozptyl a τ_s dolní mez rozdělení S/σ. Hodnota z_p je p-tý kvantil standardního normálního rozdělení. Obecný vztah S_p/σ je detailněji popsán v knize Vogel & Stedinger (1987, str. 313).

Metoda je limitována omezením ročního $C_v \leq 0,5$, což je nevhodné pro toky např. v Austrálii a jižní Africe. Rovněž se zde nedají zahrnout ztráty výparem a metoda je též aplikovatelná pouze u víceletého řízení nádrže (McMahon & Adeloye, 2005).

2.2.4 Bayazit & Bulu

Dle McMahona & Adeloye (2005) je metoda od Bayazita & Bulu zjednodušená ve vynechání 22 parametrů z Vogela & Stedingera. Standardizovali objem tím, že porovnali střední hodnotu μ_s k nule a směrodatnou odchylku σ_s k jedné. Místo škálování objemu směrodatnou odchylkou průtoku, jak provedli Vogel & Stedinger, 3-parametrická distribuce dolní meze log-normálního rozdělení je vždy rovno -2,0. Při použití této hodnoty jako τ_s a s přihlédnutím k $\mu_s = 0$ a $\sigma_s = 1$, vychází po dosazení do rovnic (4.13) a (4.14) $\mu_l = 0,5816$ a $\sigma_l = 0,4724$. Blíže popsáno v Bayazit & Bulu (1991, str. 199). S těmito hodnotami dostáváme vzorec pro objem:

$$S_p = \mu_s + \sigma_s(-2,0 + exp(0,5816 + 0,4724z_p)). \tag{2.15}$$

Bayazit & Bulu (1991) sestavili tabulky pro auto-regresivní modely na 25 a 50 let pro pravděpodobnostní rozdělení funkcí a stálé struktury pro roční průtoky (viz. Bayazit & Bulu, 1991, str. 198).

2.3 On-stream storage - detailní metody

2.3.1 Kumulativní křivka

Tahle metoda je dle McMahona & Adeloye (2005) ne příliš vhodnou metodou pro výpočet zásobního objemu z důvodu mnoha předpokladů a nedostatků. Nicméně byla dříve široce využívána a spousta zásobních objemů nádrží je na nich založená. Není proto od věci znát princip její konstrukce.

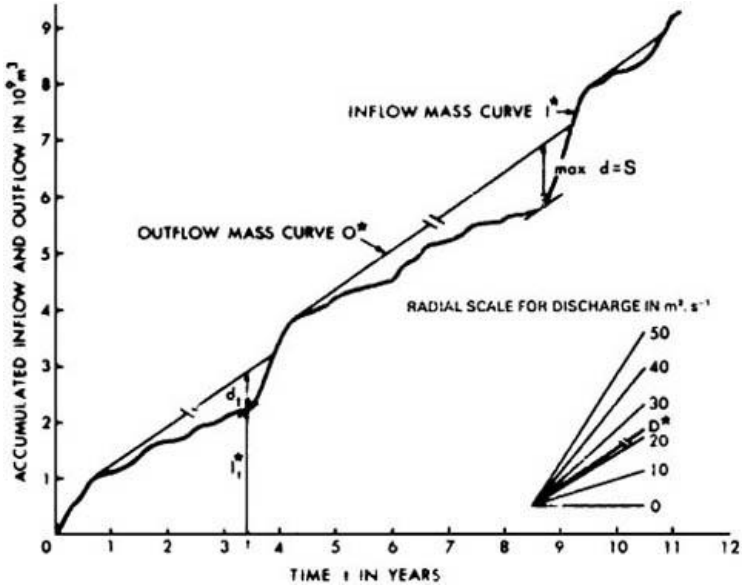
Konstrukce grafické kumulativní křivky (obrázek 2.3) sestává ze tří klíčových kroků:

1. Pro uvažovanou lokalitu se sestrojí hmotnostní nebo kumulativní křivka historických měsíčních průtoků.
2. Diagram kumulativní křivky představující konstantní odběr, který je třeba dodávat z nádrže, se proloží tečnami ke každému vrcholu křivky průtoků.
3. Najdou se největší svislé vzdálenosti mezi kumulativní křivkou průtoků a každou tečnou.

Největší nalezená vzdálenost je považována za potřebnou velikost zásobního objemu nádrže.

Předpoklady pro sestrojení jsou:

- Plná nádrž na začátku průtokové řady a proto i na začátku kritické periody.
- Je předpokládáno, že v budoucnu se v průtokové řadě neobjeví silnější suchá období, než v historických datech.



Obrázek 2.3: Kumulativní křivka (Reservoir capacity estimation, 1998)

Limity kumulativní křivky:

- Přestože je odtok (odběr) vody považován za konstantní, změny křivek sezónních kumulativních požadavků mohou nahradit konstantní křivky.
- Křivky omezení řízení, které jsou funkcí objemu, nelze zpracovat.
- Není možné spočítat velikost zásobního objemu pro určitou zabezpečenost.
- Evaporace ani jiné ztráty související s nádrží nemohou být zahrnuty přímo.

Lze provést rozšířenou deficitní analýzu k určení průměrného opakování intervalu deficitů v nádrži. Analýza je založená na rovnici kontinuity:

$$\frac{dZ}{dt} = Q(t) - D(t) \tag{2.16}$$

kde dZ/dt je rychlost změny objemu nádrže Z, $Q(t)$ a $D(t)$ jsou přítok a odtok z nádrže, vše v čase t. Opět s českým ekvivalentem $Q(t) = Q_{m,i}$ a $D(t) = O_p$. Proto je deficit D_e, pro přítok a odtok vyskytující se zároveň, roven:

$$D_e(t+1) = min[0, Z(t) + Q(t) - D(t)] \tag{2.17}$$

a pro sezónní situace, kdy přítok a odtok nejsou ve fázi:

$$D_e(t+1) = min[0, Z(t) + Q(t)] - D(t) \tag{2.18}$$

Cílem této analýzy je nalezení deficitu $Def(t)$ definovaného jako:

$$Def(t) = -min[D_e(t) \text{ mezi úniky}]. \tag{2.19}$$

Jain (2003) popisuje kumulativní křivku jako jednu z grafických metod pro výpočet zásobního objemu nádrže, jež využívá nejkritičtější období zaznamenaného přítoku. Kritická perioda je definována jako doba, po kterou je zpočátku plná nádrž vyčerpávána a postupně se bez rozlití prázdní. u metod založených na konceptu kritické periody je vedena posloupnost průtoků obsahujících kritické období v zpočátku plné nádrži za přítomnosti specifikovaných požadavků. Zásobní objem nádrže se získá pomocí nalezení maximálního rozdílu mezi křivkami kumulativního přítoku a kumulativního požadovaného odběru (odtoku). Nechť x(t) jsou přítoky do nádrže v objemových jednotkách. Funkce X(t) je definovaná následovně:

$$X(t) = \sum_t [x(t)dt] \tag{2.20}$$

Dále říká, že i přes jednoduchost a přímost této metody se zde objevuje pár nedostatků. Dá se použít pouze pro konstantní odběr z nádrže. Není možné zde zohlednit ztráty výparem. Rovněž, stejně jako spousta jiných metod, počítá s historickými průtoky, jež jasně nepředpovídají ty budoucí. Dalším nedostatkem je neschopnost počítat objem pro určitou zabezpečenost.

2.3.2 Sekvenční špičkový algoritmus

Sekvenční špičkový algoritmus (SPA) se řadí mezi simulační metody výpočtu. Jsou založeny na postupném bilancování za jistých předem daných podmínek. Metoda je široce využívána zejména pro výpočty komplexních soustav nádrží (McMahon & Adeloye, 2005). Dále budou rozvedeny Základní SPA a některé modifikace této metody.

Základní SPA je dle McMahona & Adeloye (2005) SPA ve své základní formě technika, jež předběžně určuje aktivní zásobní objem nádrže. Počítá s bezporuchovostí původně plné nádrže na základě historických dat, jinak řečeno pro 100 % zabezpečenost během N-leté periody.

Uvažujme K_t kumulativní úsekový deficit na začátku periody t v záznamu N period, K_{t+1} korespondující deficit na konci t, tj. i na začátku $t+1$, D_t odtok z nádrže a Q_t přítok během t. SPA je poté využit následovně:

Krok 1: Nastavme $K_0 = 0,0$, tj. předpoklad, že počáteční deficit je nulový (nádrž je plná).
Krok 2: Pro $t = 1, 2, ..., N$ počítejme:

$$K_{t+1} = \max\{0,0;\ (K_t + D_t - Q_t)\} \tag{2.21}$$

Krok 3: Pokud je $K_N = K_0$, pokračujeme ke kroku 4. Jinak v případě první iterace, nastavme $K_0 = K_N$ a vraťme se ke kroku 2. Pokud je to ovšem druhá iterace, je nutné výpočet ukončit, výpočet pomocí SPA selhal, protože odběr je vyšší než průměrný průtok.
Krok 4: Aktivní zásobní objem $S = \max(K_{t+1})$ ze všech $t = 1, 2, ..., N$.

Jain (2003) rovněž popisuje výpočet zásobního objemu za pomoci SPA. Podmínky pro výpočet objemu S_t jsou stanoveny následovně:

a. pokud $S_t > 0$, pak

$$S_t = S_{t-1} + R_t - I_t \tag{2.22}$$

b. pokud $S_t \leq 0$, pak $S_t = 0$

kde R_t je rovno odtoku z nádrže a I_t přítoku do nádrže.

Požadovaný zásobní objem je roven maximální hodnotě S_t.

2.3.3 Leleho sekvenční špičkový algoritmus

McMahon & Adeloye (2005) popisují Leleho SPA, jež zahrnuje úhrn srážek a výpar z nádrže. Ke stanovení čistého výparu v objemových jednotkách je třeba znát plochu hladiny v nádrži. Nicméně plocha hladiny je závislá na naplnění nádrže a s rostoucím objemem nelineárním způsobem roste i plocha pro výpar, dána výrazem:

$$A_t = cZ_t^d \tag{2.23}$$

Pro účely plánování se však k závislosti plocha-objem často přiblížíme lineárně pomocí vztahu:

$$A_t = aZ_t + b \tag{2.24}$$

kde a, b, c, d jsou koeficienty získané optimalizací za pomoci metody nejmenších čtverců, A_t je plocha hladiny na začátku časového úseku t a Z_t je zásobní objem na začátku t.

Čistý výpar v objemových jednotkách je dán vztahem

$$EV_t = be_t + 0,5Z_t(ae_t) + 0,5Z_{t+1}(ae_t) \tag{2.25}$$

kde e_t je čistý výpar měřený v ekvivalentní hloubce vody a EV_t je čistý výpar v objemových jednotkách během t (McMahon & Adeloye, 2005). Tuhle rovnici nelze přímo použít ve výpočtu SPA, proto Lele navrhl následující postup. Rovnice

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - EV_t - O_t,\ t = 1, ...N \tag{2.26}$$

přičemž O_t značí objem přetékání vody v časových intervalech t, kdy je nádrž plná. Omezujícími podmínkami jsou

$$Z_{t+1} \leq S^*,\ t = 1, ...N \tag{2.27}$$

$$Z_{t+1} \geq 0.0,\ t = 1, ...N \tag{2.28}$$

kde správnou fyzickou kapacitu zásobního objemu obsahující i povrchové toky značíme S^*.

Poté se provede výpočet SPA a z kritické periody se stanoví se objemy a deficity.

- $Z_{ICRIT+1} = 0$ (zásobní objem na konci kritické periody je roven nule)
- $Z_{IOVF} = S$ (zásobní objem na začátku kritické periody je roven kapacitě nádrže)
- $K_{ICRIT+1} = S$ (deficit na konci kritické periody je roven kapacitě nádrže)
- $_{IOVF} = 0$ (deficit na začátku kritické periody je roven nule)

Lze tak ve zpětném chodu spočítat naplnění nádrže Z_t zahrnující výpar z nádrže mezi začátkem ($IOVF$) a koncem ($ICRIT$) kritické periody. Výpočet začíná v hodnotě $ICRIT$ a po úsecích pokračuje přes $ICRIT - 1, ICRIT - 2, ..., IOVF + 1$ dosazením do rovnice

$$Z_t = \frac{Z_{t+1}(1 + 0,5ae_t) + D_t + be_t - Q_t}{1 - 0,5ae_t} \tag{2.29}$$

pro $t = ICRIT, ICRIT - 1, ICRIT - 2, ..., IOVF + 1$

Jednoduché uplatnění zpětného chodu výpočtu spočívá v počáteční hodnotě $Z_{t+1} = K_{ICRIT+1} = 0$. Maximální hodnota Z_t během kritické doby je přesná aktivní kapacita zásobního objemu nádrže:

$$S^* = Z_{IOVF+1} \tag{2.30}$$

Následuje ověření, zda výpar ovlivnil kritickou periodu. Pokud ano, musí být přepočítán výpar EV_t s aktuálními hodnotami Z_{t+1} a celý proces zopakován.

V souhrnu je třeba provést 4 kroky výpočtu:

Krok 1: Zahájení

1.1 Stanovení Q_t, D_t, E_t, P_t, a, b (kde E_t je výpar (mm) a P_t je úhrn (mm) během t). Hloubka čistého výparu je $e_t = E_t - P_t$

1.2 $EV_t = 0$ pro všechna $t = 1, ..., N$.

Krok 2: Sequent peak procedure.

2.1 $K_0 = 0$

2.2 Výpočet $K_{t+1} = \max\{0, (K_t + D_t + EV_t - Q_t)\}$ pro všechna $t = 1, ..., N$.

2.3 Pokud $K_{N+1} = K_0$, pokračuje se ke 2.4; jinak se výpočet zastaví, protože hrubý odběr je větší než průměrný přítok.

2.4 Nalezne se perioda, pro kterou K_{t+1} je maximum ze všech $t = 1, ..., N$, nazvané $ICRIT$, a proto se předurčené $S = KICRIT + 1$.

2.5 Zpětné hledání od $t = ICRIT$ dokud se poprvé nesetkáme s $K_t = 0$.

Krok 3: Výpočet Z_t během kritické periody zahrnující povrchový výpar.

3.1 $K_{ICRIT+1} = 0$.

3.2 Pro $t = ICRIT$ zpět k $t = IOVF + 1$ se vypočte:

$$Z_t = \frac{Z_{t+1}(1 + 0,5\,ae_t) + Q_t - D_t + be_t}{1 - 0,5\,ae_t} \tag{2.31}$$

3.3 $S^* = Z_{IOVF+1}$.

Krok 4: Kontrola adekvátnosti S^* během vodných období.

4.1 Pro $t = ICRIT + 1$ vpřed k $t = IOVF - 1$ se vypočte

$$Z_{t+1} = min\,\{S^*, \frac{Z_{t+1}(1 + 0,5\,ae_t) + Q_t - D_t + be_t}{1 - 0,5\,ae_t} \tag{2.32}$$

4.2 Pokud kterékoliv Z_t nabyde záporné hodnoty, přejde se ke kroku 4.3, jinak se výpočet zastaví; S^* je potom hledaný aktivná zásobní objem.

4.3 Vypočte se $EV_t = e_t[0,5a(Z_tZ_{t+1}) + b]$ pro všechna $t = 1, ..., N$ a zopakuje se proces od kroku 2.

2.3.4 Montaseriho sekvenční špičkový algoritmus

Modifikaci SPA provedl dle McMahona & Adeloye (2005) Montaseri. Zpochybnil poslední krok Leleho algoritmu s tím, že kritická perioda může být posunuta vzhledem k začlenění čistého výparu. Indentifikoval čtyři možné režimy, ve kterých by mohla být kritická perioda ovlivněna:

1. Reálný začátek může být před určeným, $IOVF$.
2. Může pokračovat za určený konec, $ICRIT$.
3. Kombinací 1. a 2.
4. Může se kompletně přesunout do jíné části datové řady.

Navrhl alternativní řešení, které vyhoví všem čtyřem možnostem místo ověření u Leleho, které vyhoví pouze první z těchto možností. v alternativním řešení není dřívější výpočet důležitý, protože úprava pro čistý výpar není omezena určenou kritickou periodou v celé průtokové řadě. Vzhledem k tomu nový algoritmus také eliminuje potřebu kontroly nezápornosti jako u Leleho.

Montaseriho algoritmus také začíná se základním SPA při výpočtu úsekových deficitů $(K_{t+1}; t = 1, ..., N)$ a přibližné kapacity zásobního objemu S. Potom je přibližný stav zásobního objemu (Z_t) určen odečtením K_t z S. Z_t je potom použit k získání výparu z hladiny EV_t. Potom se zahrnutím určeného výparu z hladiny je třaba stanovit novou kapacitu nádrže. Tento proces je opakován, dokud se kapacita neulstálí, většinou po třech až čtyřech iteracích. Nový algoritmus využívá konvergentní kriterium dané:

$$|\frac{(S' - S)}{S}| \leq 0,0001 \tag{2.33}$$

kde S' a S jsou předpoklady kapacity aktivního zásobního objemu v jakýchkoliv dvou následujících iteracích. Souhrn nového algoritmu je následující:

krok 1: Stanovení Q_t, D_t, E_t, P_t, a, b.

krok 2: Předurčení přibližné kapacity s za použití basic SPA.

krok 3: Provedení iterace k předurčení pravého S^*, který zahrnuje vypařování následovně:

- 3.1 Pokud je tohle první iterace nebo předchozí rovnice větší než 0,0001, potom pokračujme ke kroku 3.2, jinak se výpočet zastaví, protože s je rovno aktivnímu zásobnímu objemu.
- 3.2 Nastavení $S' = S$.
- 3.3 Výpočet $Z_t = S - K_{t-1}$ pro všechna $t = 1, ..., N$.
- 3.4 Výpočet $EV_t = e_t[0,5a(Z_t + Z_{t+1}) + b]$ pro všechna $t = 1, ..., N$.
- 3.5 Předurčení nového S používající SPA a hodnoty EV_t
- 3.6 Pokračovat od kroku 3.1.

2.3.5 Simulace založená na zásobním objemu - Analýza chování

Analýza chování je všestrannější než SPA a je schopna jednodušeji zahrnout výpar z nádrže a omezení vypouštění vody z nádrže. Je také schopna pracovat s různými definicemi zabezpečenosti a konfiguracemi i velice komplexních systémů.

Je založena na bilanci přítoků a odtoků z nádrže:

$$Z_{z+1} = Z_t + Q_t - D'_t - e_t A_t - L_t \tag{2.34}$$

s omezujícími podmínkami $0 \leq Z_{t+1} \leq S$.

Z_{t+1} a Z_t značí plnění nádrže v čase $t+1$ a t, Q_t je přítok do nádrže za dobu t, D'_t je odtok v objemových jednotkách během doby t, e_t výpar z hladiny nádrže za dobu t, A_t plocha hladiny čistého výparu v čase t, L_t ztráta průsakem v objemových jednotkách během doby t a S je aktivní kapacita zásobního objemu.

K analýze systému nádrže se známým či předpokládaným zásobním objemem se využije rovnice (2.34) pro simulaci plnění nádrže za použití nepřerušeného záznamu průtoků ve spojení se známým nebo předpokládaným odběrem a hodnotami ztrát výparem. (McMahon & Adeloye, 2005).

2.3.6 Gouldova matice pravděpodobnosti přechodu (TPM)

Gouldova TPM bere v potaz sezónnost a sériovou korelaci měsíčních průtoků. Gould začlenil do matice roční pravděpodobnosti přechodu obsahu nádrže jednoduchou měsíční vodní bilanci přítoků a odtoků. Tímto přístupem byl schopen realistickým způsobem zahrnout variace měsíčních průtoků, odběrů, sériové korelace a úprav čistého výparu. Bez ohledu na to, zda je cílem odhadnout velikost úložiště, výnos nebo zabezpečenost (pravděpodobnost selhání), obecný přístup je stejný. Pro danou nebo předpokládanou kapacitu nádrže se nastaví TPM ze známých nebo předpokládaných hodnot odtoku a čistého výparu a poté se odhadne zabezpečenost. Je-li konstrukční proměnnou velikost úložiště nebo odtok, bude nutné použít řešení metodou pokus-omyl, jinak lze zabezpečenost určit přímo jediným pokusem. Kroky předpovědi S-Y-P za pomoci Gouldovy TPM jsou následující:

1. Uvažovat se bude na základě dat měsíčních odtoků z nádrže značených D_j s českým ekvivalentem nalepšeného odtoku O_p. Metoda umožňuje, aby byl návrh funkcí velikosti zásobního objemu, kdy lze jednoduše vzít v úvahu omezení v podobě stavu nádrže. Gouldův přístup vyžaduje, aby roční odtoky byly časově neměnné.

2. Rozhodnout, zda bude považována zabezpečenost závislá na čase - z hlediska let nebo měsíců, nebo na velikosti objemu.

3. Zavést aktivní kapacitu nádrže nebo její velikost předpokládat (S).

4. Je třeba rozdělit kapacitu na K částí. z předchozích studií bylo zjištěno, že 20 je dostačujících (McMchon & Adeloye, 2005). Nicméně je doporučeno začít s dvaceti částmi a postupně počet zvyšovat, dokud nebude dosaženo stabilní hodnoty pravděpodobnosti selhání. Velikost objemu v každé části K je:

$$W = \frac{S}{K-2} \tag{2.35}$$

kde W značí velikost objemu v částech K s vynecháním prázdné a plné zóny, jež má nulovu kapacitu a S je celková aktivní kapacita nádrže.

Sestrojí se KxK matice pravděpodobnosti přechodu, která ukazuje stav naplnění nádrže na začátku doby $t+1$ a dává stav naplnění na začátku doby t.

5. Použije se bilanční rovnice

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D'_t - EV_t \; ; \; 0 \leq Z_{t+1} \leq S \tag{2.36}$$

kde Z_{t+1} a Z_t značí naplnění nádrže v čase $t+1$ a t, Q_t je přítok do nádrže během doby t, D'_t je odtok z nádrže v jednotkách objemu během doby t a EV_t jsou ztráty z čistého výparu, rovněž v jednotkách objemu, během doby t.

Pro každý rok z N let průtokových dat je měsíc po měsíci aplikována rovnice (2.35) k určení částí K, kdy nádrž končí na konci roku. Pokud Z_{t+1} skončí v části 0 během kteréhokoliv roku, onen rok je považován za poruchový.

Podrobný postup vyřešení matice pravděpodobnosti překročení lze nalézt v knize McMahon & Adeloye (2005, str. 90).

2.4 Optimalizační metody

McMahon & Adeloye (2005) uvádí přehled optimalizačních metod zahrnující mimo jiné lineární programování (LP), nelineární programování (NLP) a dynamické programování (DP). LP má výhodu nad ostatními optimalizačními technikami v jednoduchosti porozumění a dostupnosti připravených algoritmů.

Předpokládá se klasické určení velikosti zásobního objemu S (dle předchozích metod) bez sekundárních procesů, jako například ztráty výparem, přímé srážky a prosakování. Pak je formulací základního LP:

minimalizace S za pomoci:

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D - O_t; \; t = 1, 2, ..., N \tag{2.37}$$

$$Z_t \leq S; \; t = 1, 2, ..., N \tag{2.38}$$

$$Z_t, D, O_t \geq 0; \; t = 1, 2, ..., N \tag{2.39}$$

kde D je konstantní odtok z nádrže, Q_t je přítok do nádrže během periody t (což může být např. měsíc nebo rok), dále N je počet period v analyzovaném období, Z_t je naplnění nádrže na začátku periody t a Z_{t+1} naplnění na konci periody t, O_t jsou všechny ostatní odtoky (odběry) z nádrže, jež nejsou D, během periody t a S je velikost zásobního objemu nádrže. k vyřešení problému je třeba mít daný počáteční naplnění nádrže Z_1. Pokládá se rovno neznámému S, tudíž je předpokládaná původně plná nádrž.

Zavedení ztrát čistým výparem je u LP velice podobné jako Leleho sekvenční špičkový algoritmus (viz sekce 2.3.3).

Jain (2003) zmiňuje v rámci optimalizačních technik dynamické a lineární programování. Říká, že jsou to široce využívané metody, přičemž podrobněji rozebírá lineární verzi. Předpokládá znalost přesného umístění nádrže, historických měsíčních přítoků za n let a požadavků na odběr vody. Hledá minimální objem nádrže pro stoprocentní zabezpečenost.

Uvažuje X jako roční požadavek na odběr vody z nádrže a α_i, $i = 1, 2, ..., 12$ budou zlomky z tohoto pro jednotlivé měsíce. Proto velikost požadovaného odběru v určitém měsíci bude rovna $\alpha_i X$. I_i značí přítok do nádrže během i-tého měsíce a R_i vodu z nádrže skutečně vypuštěnou.

Velikost objemu S_i na začátku i-tého měsíce je znázorněna rovnicí:

$$S_i + I_i - R_i = S_{i+1} \tag{2.40}$$

Tato rovnice musí být použita pro každý z n měsíců. Hodnota S_i je dána jako vstupní hodnota.

Je také požadováno, aby množství skutečně vypuštěné vody z nádrže bylo větší či rovno požadavkům na odběr vody. Matematicky vyjádřeno jako:

$$R_i \geq \alpha_i X \; i = 1, 2, ..., n \tag{2.41}$$

Jelikož tato podmínka musí být splněna pro každý měsíc, vzniká n takových omezení. Pokud je požadovaný objem nádrže roven C, pak musí být velikost obsahu objemu nádrže v každém měsíci rovna nebo menší než tato hodnota. Proto:

$$C \geq S_i \; i = 1, 2, ..., n \tag{2.42}$$

Mimo to, hodnoty S_i, C a R_i mohou nabývat pouze kladných hodnot.

2.5 Analýza výnosu zásobního objemu

Jain (2003) představuje analýzu výnosu zásobního objemu pro předurčení velikosti zásobního objemu k nalepšení průtoku vody v toku při dané zabezpečenosti nádrže. Určení zásobního objemu záleží na velikosti odběru vody z nádrže D, zabezpečenosti R, jež se pohybuje v intervalu $<0; 1>$ a hydrografu sběrného povodí. Pro výpočet využívá Fibonacciho vyhledávací techniku.

Při dostatečně dlouhé průtokové řadě (přesnou délku nezmiňuje), daném odběru a zabezpečenosti je tedy možné pomocí této analýzy určit velikost požadovaného zásobního objemu, a to v následujících krocích:

a. Na začátku iterace je horní hranice proměnné rovna průměrnému přítoku v roce. Spodní hranice nádrže je brána jako mrtvý prostor S_{min}. Hodnota pro roční vydatnost je uvažována nula.

b. Nádrž je zpočátku považována za plnou.

c. Rovnice kontinuity je použita pro každý časový krok

$$S_{t+1} = S_t + I_i - E_t - L_t \tag{2.43}$$

d. Výslednou řadu hodnot zásobního objemu nádrže lze vynést do grafu v závislosti na čase, aby se ukázalo chování nádrže pro zvolenou zkušební kapacitu.

e. Na základě výsledků výše se vypočítá zabezpečenost.

f. Pokud jsou hodnoty zabezpečenosti příliš malé, je nutno zvolit větší objem a kroky a.-e. zopakovat.

g. Pokud jsou dostačující hodnoty zabezpečenosti menší než vypočítané, je zvolen menší objem a kroky a.-e. zopakovány.

h. Tento pokus-omyl proces je prováděn tak dlouho, dokud není dosaženo kýžené zabezpečenosti.

Česká republika

U nás metody výpočtu zásobního objemu nádrže dělíme na metody simulační a statistické (analytické). Výraznými osobnostmi v tomto odvětví, z jejichž materiálů je v této kapitole čerpáno, jsou L. Votruba, V. Broža, A. Patera, K. Nacházel, P. Fošumpaur, M. Starý, I. Kazda a další. Základní rovnice nádrže je dle Starého (2006) zapsána ve tvaru:

$$dV = (Q(t) - O(V(t)))dt \tag{2.44}$$

kdy Q_t a $O(V(t))$ vyjadřují střední hodnoty přítoku a odtoku vody z nádrže na dt (dále jen "přítok" a "odtok"). "Rovnici je možno přepsat jako základní diferenciální rovnici prvního řádu (...):

$$Q(t) - O(V(t)) = \frac{dV(t)}{dt} \tag{2.45}$$

kde $dV(t)/dt = R(t)$ značí okamžitou změnu objemu vody v nádrži a nazývá se retencí. Pokud je tedy:

a. $Q(t) > O(V(t))$, je retence $R(t) > 0$, nádrž se plní,

b. $Q(t) < O(V(t))$, je retence $R(t) < 0$, nádrž se prázdní,

c. $Q(t) = O(V(t))$, je retence $R(t) = 0$, plnění nádrže se nemění.

Derivujeme-li rovnici (2.40) podle času, získáme vztah:

$$\frac{dQ(t)}{dt} - \frac{dO(V(t))}{dt} = \frac{dR}{dt} \tag{2.46}$$

nebo

$$\frac{dQ(t)}{dt} - \frac{dO(V(t))}{dt} = \frac{d^2V}{dt^2} \tag{2.47}$$

Pro lokální extrémy funkce R(t) platí

$$\frac{dR}{dt} = 0 \tag{2.48}$$

Objem vody, který přiteče do nádrže v libovolném časovém intervalu $< t_0, t >$, je dán integrálem

$$V(t) - V(t_0) = \int_{t_0}^{t} [Q(t) - O(v(t))]\, dt \tag{2.49}$$

jehož hodnota se v případě $Q(t) > O(V(t))$ zvětšuje a v případě $Q(t) < O(V(t))$ zmenšuje. Je-li tedy počáteční plnění nádrže v čase t_0 tovno V_0, je možno plnění nádrže v libovolném čase t určit vztahem (...)

$$V(t) = V_0 + \int_{t_0}^{t} [Q(t) - O(v(t))]\, dt]$$

Protože plnění nádrže

$$V(t) \in < 0, V_{MAX} > \tag{2.51}$$

kde V_{MAX} je maximální objem nádrže."v integrálu lze měnit hodnotu $O(V(t))$, naopak $Q(t)$ je funkce neměnná.

Výraz je možné přepsat do součtového tvaru:

$$V_n = V_0 + \sum_{i=1}^{n} [Q_i - O_i(V_i)].\triangle t_i \tag{2.52}$$

"kde $\triangle t_i$ je i-tý časový interval, na které rozdělíme $< t_0, t >$, Q_i a $O_i(V_i)$ jsou střední hodnoty Q_t a $O(V(t))$ na časovém intervalu $\triangle t_i$ a n je n-tý interval $\triangle t$, na které rozdělíme $< t_0, t >$, V_n je plnění nádrže na konci intervalu $\triangle t_n$."

Analogicky zapsaný diferenční tvar základní rovnice nádrže je nádledovný:

$$Q_i - Q_i(V_i) = \frac{\triangle V_i}{\triangle t_i} \tag{2.53}$$

2.6 Simulační metody

Simulační modely vycházejí ze součtového tvaru základní rovnice nádrže (2.47). Lze pomocí nich řešit velikost zásobního objemu v reálných i umělých průtokových řadách.

Starý (2006) popisuje princip řešení pomocí simulace jako "matematická technika, která napodobuje posloupností aritmetických a logických algoritmů provoz nádrže ve sledovaném časovém úseku $<t_0, t_n>$ při zadané počáteční podmínce (plnění nádrže v čase t_0 a zadání omezujících podmínek (jež závisí na typu úlohy...)."Jako simulace se zde používá postupně bilanční metoda. Základními údaji jsou informace o přítoku vody do nádrže a odtoku vody z nádrže, které se však kvůli své složitosti nedají analyticky vyjádřit. Můžeme ale přistoupit k jejich interpretaci pomocí tabelárních či grafických zpracování. Dostáváme se tak k základní rovnici nádrže (viz kapitola 5).

Typ simulačního modelu lze rozdělit dle podkladů na jejichž základě úlohu počítáme a změn v průběhu výpočtu. Dostáváme tak simulační model:

- deterministický
- stochastický
- statický
- dynamický.

Deterministický model používá jako podklad reálnou průtokovou řadu. Naopak stochastický řeší úlohu na základě řady umělé. Statický model na rozdíl od dynamického v průběhu řešení nerespektuje změny nároků uživatelů ani změny strategie řízení odtoku.

2.6.1 Úloha zásobního objemu A.1

Úlohu A.1 $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100\%$ lze řešit simulačním modelem. Starý (2006) jeho postup popisuje jako "hledaná veličina v zadané oblasti se s určitým krokem volí a stává se v řešení parametrem. Pro každou volenou hodnotu parametru opakovaně simulujeme novou variantu provozu nádrže a v ní vyhodnotíme sledované kritérium (zabezpečenost). z vyřešených vybereme tu variantu, ve které se kritérium se zadanou přesností shoduje s požadovanou hodnotou. v ní volený parametr se pak stává výsledkem řešení. (...) Úloha vede na optimalizaci, ve které je neznámou řešený parametr a kritériem je rozdíl mezi vypočtenou P a požadovanou $\overline{P}$ zabezpečeností, které se minimalizuje."

Úloha je tak řešena jako jednorázová simulace provozu nádrže. Časový krok $\triangle t$ je vhodné volit jako 1 měsíc ($= 2,63.10^6$). Počáteční podmínkou pro výpočet je plná nádrž, tedy nulové prázdnění.

Postupně je v každém měsíci provedena bilance mezi požadovaným nalepšeným odtokovým množstvím O_p, $\triangle t$ a přítokovým množstvím Q. $\triangle t$. Simulace prázdnění nádrže je dle Starého (2006) znázorněna následovně: "Pokud v daném měsíci $O_p > Q$, nádrž se prázdní, a pokud $O_p < Q$, nádrž se plní. Změna prázdnění nádrže na konci každého měsíce je získána tak, že dílčí bilanci mezi požadovaným odteklým a přiteklým objemem vody přičteme ke stavu prázdnění na konci předchozího měsíce. (...) Pokud je nádrž plná (prázdnění je nulové) a platí, že přítok v daném měsíci je větší než požadovaný nalepšený odtok, nádrž není možno dále plnit, což se projeví vynuceným zvětšením skutečného odtoku oproti plánu (...) v takovém případě píšeme automaticky nulu. Dojde-li k naplnění nádrže v průběhu měsíce (pak by vyšlo při mechanickém uplatňování daného algoritmu záporné číslo, což není možné), píšeme rovněž (...) nulu."

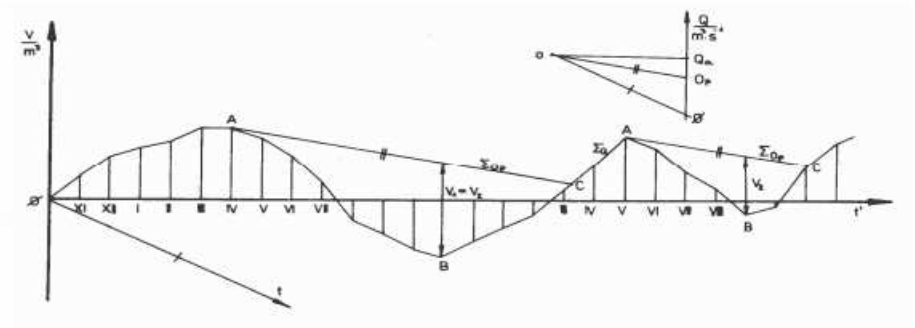
Pro zjištění výsledku zásobního objemu V_z hledáme maximální hodnotu vyprázdnění nádrže.

Výpočet je možné také provést v poměrných hodnotách a pouze výsledné maximum přenásobit $\triangle t$.

2.6.2 Úloha zásobního objemu B.1

Úloha B.1 $V_z = F_1(O_p, P)$ pro $P = 100\%$ je grafickým řešením zásobního objemu nádrže. Dle Starého (2006) se sestrojí součtová čára přítoku do nádrže a pólové měřítko. Na měřítku se vyznačí velikost nalepšeného odtoku O_p, čímž se získá sklon součtové čáry odtoku $\sum O_p$. Simulace začíná v počátku a postupuje v měsíčním kroku až do konce řešeného období. v každém měsíci se testuje, zda je sklon součtové čáry $\sum Q$ větší než součtové čáry $\sum O_p$. "Pokud ne, znamená to, že přítok z nádrže je v daném měsíci větší než požadovaný nalepšený odtok. v takovém případě, je-li nádrž plná, je odtok roven přítoku a čáry $\sum Q$ a $\sum O_p$ se ztotožní. v ostatních případech je odtok roven O_p, dokud se nádrž nenaplní. Pokles přítoku Q pod hodnotu nalepšeného odtoku se projeví rozdělením součtových čar $\sum O \equiv \sum O_p$ a $\sum Q$. (...) Rozdělení čar $\sum O_p$ a $\sum Q$ signalizuje počátek prázdnění nádrže (málovodné období), kdy pokles Q vzhledem k požadovanému odtoku O_p dorovnáme vodou, nahromaděnou ve vodném období. Objem vody nutná k dorovnání (od počátku suchého období) je dán v kterémkoliv čase svislou ekvidistantou součtových čar $\sum O_p$ a $\sum Q$. Pokud na konci suchého období stoupne přítok Q nad hodnotu O_p, začnou se obě součtové čáry opět přibližovat a v okamžiku naplnění nádrže splynou."(Starý, 2006). Cílem je v řešeném období při simulovaném provozu najít největší vyprázdnění nádrže. To je pak rovno hledané velikosti V_z. "Součtová čára odtoku vody z nádrže tvoří horní obálku obou součtových čar $\sum O_p$ a $\sum Q$. Skutečný odtok v libovolném okamžiku zjistíme, vedeme-li pólem paprsek rovnoběžný

se součtovou čarou, který nám na měřítku průtoku protne hledanou hodnotu."(Starý, 2006). z názorného obrázku 2.3 je patrný postup řešení.



Obrázek 2.4: Schéma stanovení zásobního objemu nádrže pro $P = 100\%$ (Starý, 2006)

2.6.3 Zásobní objem pro víceleté řízení odtoku

Zásobní objem pro víceleté řízení řízení odtoku je možné řešit v reálných i v umělých průtokových řadách. v reálných je však třeba mít minimálně 30 až 40 letou řadu dostatečně reprezentativních průměrných měsíčních průtoků a řešení je vhodné pro méně významné nádrže se slabě víceletým řízením. Čím delší máme průtokovou řadu, tím je výpočet spolehlivější. Počáteční podmínkou je plná nádrž. Simulace se současně provádí v celém návrhovém období. Na konci prvního cyklu je třeba zkontrolovat, zda došlo k naplnění nádrže a pokud ne, musí se pokračovat v cyklu druhém až do naplnění (Starý, 2006).

2.6.4 Umělé průtokové řady

V umělých průtokových řadách je dle Vortuba a Broža (1980) podmínkou jednoznačně určený odběr (odtok) z nádrže v každém kroku řešení. "Uvažujeme dlouhou náhodnou průtokovou řadu, v níž každý člen $Q(\triangle t_i)$ vyjadřuje průměrný průtok v časovém intervalu $\triangle t_i$ dán průměrnou hodnotou $O(\triangle t_i)$. Bilanční deficit $(\triangle t_i)$ v intervalu $\triangle t_i$ je dán vztahem

$$\triangle V(\triangle t_i) = [O_p(\triangle t_i) - Q(\triangle t_i)].\triangle t_i \tag{2.54}$$

Na začátku řady je nutno zvolit počáteční naplnění zásobního prostoru nádrže. Při dostatečné délce řady volba počátečního naplnění výsledek řešení prakticky neovlivňuje. Obvykle se uvažuje zásobní prostor plný."Při řešení se obvykle zavádí velikost zásobního objemu V_z' vedle odběru O_p, přičemž se hledá zabezpečenost dodávky vody p. Postupně jsou provedeny součty dle rovnice

$$V_k = \sum_{i=1}^{i=k} \triangle v\ (\triangle t_i) = \sum_{i=1}^{i=k} [O_p(\triangle t_i) - Q(\triangle t_i)]\ \triangle t_i \tag{2.55}$$

s následujícími omezujícími podmínkami:

a. pokud $V_k < 0$, nádrž je plná, a v daném kroku uvažujeme $V_k = 0$, v dalším kroku výpočtu V_{k+1} se pokračuje s touto hodnotou

b. pokud $V_k > V_z'$, nádrž je prázdná a pro výpočet uvažujeme $V_k = V_z'$, odtéká totiž pouze přítok. s touto hodnotou se počítá v následujícím kroku $k+1$. Došlo tak k poruše dodávky vody vzhledem k tomu, že nebyl zabezpečen celý plánovaný odběr O.

"Řešení v sobě zahrnuje všechny výhody statistického přístupu k dané problematice a jednoduchost a přehlednost simulační metody."(Starý, 2006)

Broža (1981) popisuje na příkladu desetiletého úseku "přímé řešení v chronologické průtokové řadě". Je téměř totožné jako výpočet od Votruba a Broža (1980) v umělých průtokových řadách. Rozdílem je pouze jiné značení členů výpočtu.

2.6.5 Roční řízení odtoku

U ročního řízení odtoku je možné se uchýlit k řešení v návrhovém období - postup je stejný jako u víceletého řízení odtoku v reálných i umělých průtokových řadách, či v návrhových rocích. To je použitelné pro méně významné nádrže s lokálním významem. Dle Votruba a Broža (1980) se roční řízení odtoku řeší "aspoň ve třech nebo pěti *návrhových vodohospodářských rocích*: v jednom nebo ve dvou mimořádně málovodných rocích (v roce extrémním a dalším, s četností překročení ročního odtoku $p = 90\%$), v jednom roce blízkém průměrnému a v jednom nebo dvou vodných rocích (v roce nejvodnějším a dalším, s četností překročení ročního odtoku $p' = 100 - p$)."Postup výpočtu je opět shodný s výpočtem úlohy A.1. Počáteční podmínku volíme plnou nádrž, ale je možné vycházet i z prázdné nádrže, a to u úplného ročního vyrovnání.

Broža (1993) také popisuje velice jednoduchý výpočet postupným bilancováním v průměrných měsíčních průtocích. Řešení provádí v jediném málovodném období o délce T, ve kterém jsou měsíční přítoky do nádrže P menší než odběry (nalepšené odtoky) O_p. Pro každý měsíc v roce provede výpočet $P_i - O_i$ a tyto výsledky následně postupně sumuje. Když je suma i-tého kroku záporná, pokračuje s tímto číslem v kroku $i + 1$. v momentě dosažení hodnoty větší než 0 je výpočet "pozastaven" a nepřetržité následující měsíce, jež mají kladný rozdíl hodnot P_i a O_i jsou ze sumace vynechány. Znovu se začíná sumovat u nejbližší záporné hodnoty rozdílu a postup se opakuje. Nakonec se hledá nejmenší hodnota ve sloupci se sumami, která bude představovat velikost zásobního objemu. Při počítání v $[m^3s^{-1}]$ výsledky přenásobíme hodnotou t [s], jež je počet sekund za časový krok (v tomto případě měsíc).

Patera (2002) popisuje přímé řešení celkového zásobního objemu víceleté nádrže rovněž obdobně jako Votruba a Broža (1980). Využívají funkci

$$V_z = f(O, P),\ resp.\ \beta = (\alpha, P) \tag{2.56}$$

kde O vyjadřuje odběr (odtok) z nádrže, α poměrný součinitel nalepšení odtoku a P zabezpečenost odběru.
"Podmínkou řešení je jednoznačně určený odběr O_i z nádrže v každém kroku řešení, který bývá často konstantní a znalost požadované zabezpečenosti tohoto odběru, která je dána např. normou ČSN 736815 (norma ČSN 736815 nahrazená platnou normou ČSN 752405) pro různé typy odběru. Bilanční deficit v i-tém časovém intervalu (zpravidla jeden měsíc) je dán vztahem:

$$\triangle V_i = (O_i - Q_i).\triangle t \tag{2.57}$$

Následující postup obvykle vychází z volby objemu zásobního prostoru V_z odhadem. k tomuto objemu se následně určí zabezpečenost dodávky vody P, která se porovná s požadovanou zabezpečeností a postup se iterativně opakuje do dosažení uspokojivé shody mezi požadovanou a vypočtenou zabezpečeností."
Výpočet V_k dle vzorce

$$V_k = \sum_{i=1}^{k}[V_i] = \sum_{i=1}^{k}[(O_i - Q_i).\triangle t] \tag{2.58}$$

se řídí následujícími omezujícími podmínkami:

a. pokud $V_k < 0$, nádrž je plná, přebytečný přítok odtéká jalově a v daném kroku uvažujeme $V_k = 0$, v dalším kroku výpočtu V_{k+1} použijeme tuto hodnotu

b. pokud $V_k > V_z$, nádrž je prázdná a pro výpočet uvažujeme $V_k = V_z$, odtéká totiž pouze přítok. s touto hodnotou se počítá v následujícím kroku $k+1$. Došlo tak k poruše dodávky vody vzhledem k tomu, že nebyl zabezpečen celý plánovaný odběr O_i.

Krátkodobé řízení odtoku Řešení je shodné s ročním řízením odtoku z prázdné nádrže. Rozdílem je délka cyklu, která se rovná délce daného způsobu řízení - denní, týdenní apod. Bilancování přítoku a odtoku tedy probíhá v časovém intervalu převážně 1 hodina (Votruba a Broža, 1980).

2.7 Statistické metody

2.7.1 Víceleté řízení odtoku

Votruba a Broža (1980) zmiňují metody založené na analytickém řešení zásobní funkce nádrže. Jako podmínku pro použití těchto metod uvádí nutnost rozdělení zásobního objemu nádrže V_z na dvě složky, a to složku víceletou V_z^v a složku sezónní V_z^s, pro které platí:

$$V_z = V_z^v + V_z^s \tag{2.59}$$

nebo v proměnných hodnotách

$$\beta_z = \beta_z^v + \beta_z^s \tag{2.60}$$

Vzhledem k nekonečně mnoha možným řešením funkce $V_z = f(O_p, p)$ z různých vyhovujících součtů sezónní a víceleté složky je třeba zavést podmínku v podobě zabezpečenosti. "Obvykle se volí zabezpečenost víceleté složky rovná návrhové zabezpečenosti dodávky vody P, a k ní se přiřadí sezónní složka tak, aby byla splněna podmínka

$$V_z(O_p, P) = V_z^v(O_p, P) + V_z^s(O_p, p_2) \tag{2.61}$$

bez ohledu na velikost zabezpečenosti p_2 samotné sezónní složky."

Víceletá zásobní složka se zde řeší pomocí základních statistických charakteristik, a to:

- dlouhodobý průměrný průtok Q_a,
- koeficient variace průměrných ročních průtoků C_v,
- koeficient asymetrie průměrných ročních průtoků C_s,
- korelační funkce $r(\tau)$.

"První tři charakteristiky postačují k určení teoretických čar překročení, korelační funkce vyjadřuje *vnitřní strukturu posloupnosti*. Pomineme-li zatím vliv korelační funkce (Krickij - Menkel, 1932), stačí ke stanovení víceleté složky zásobního objemu znát délku návrhového málovodného období n (počet roků) a průměrný průtok za toto období $Q_a(p)$ (přítok do nádrže), s pravděpodobností překročení p rovnou návrhové zabezpečenosti P podle počtu bezporuchových let. Pak

$$V_z^v = nT_r[O_p - Q_n(p)] \tag{2.62}$$

nebo v proměnných hodnotách

$$\beta_z^v = n[\alpha - k_n(O_p)]\ [m^3] \tag{2.63}$$

kde $k_n(p) = Q_n(p)/Q_a$ a T_r je počet sekund za rok ($T_r = 31,6.10^6$ [s])."

Při výpočtu se začíná uvažovat s jednoletým málovodným obdobím $n = 1$, přičemž stačí z teoretické čáry překročení průměrných ročních průtoků $Q_r = f(p)$ odečíst hodnotu $Q_1(p)$ pro $p = P$ a provést výpočet pro

$$V_z^v(1) = T_r[O_p - Q_1(p)] \tag{2.64}$$

Poté se pro dvouleté období vypočte z řady průměrných ročních průtoků $Q_{r,1}, Q_{r,2}, Q_{r,3}$, ..., $Q_{r,n}$ průměrné hodnoty za dvouletí:

$$Q_1(2) = \frac{Q_{r,1} + Q_{r,2}}{2}, Q_2(2) = \frac{Q_{r,2} + Q_{r,3}}{2}, ..., Q_n(2) = \frac{Q_{r,n-1} + Q_{r,n}}{2} \tag{2.65}$$

Z těchto vypočtených hodnot se sestaví empirická čára překročení, k níž se přiřadí teoretická křivka a poté opět pro $p = P$ odečteme průměrný průtok, tentokrát v návrhovém dvouletí $Q_2(p)$. Provede se výpočet pro:

$$V_z^v(2) = 2T_r[O_p - Q_2(p)] \tag{2.66}$$

Analogický postup je použit pro výpočet období tříletého, čtyřletého, atd. Pro k-leté návrhové období tedy bude platit:

$$V_z^v(k) = kT_r[O_p - Q_k(p)] \tag{2.67}$$

"Od jisté hodnoty k se začnou hodnoty $V_z^v(k)$ zmenšovat, pokud ovšem $O_p < Q_a$ ($\alpha < 1,0$). Při $O_p \geq Q_a$ roste se vzrůstem k pravá strana rovnice (2.62) nade všechny meze.

Pak návrhová velikost víceleté složky zásobního objemu

$$V_z^v = max\{kT_r[O_p - Q_k(p)]\} \tag{2.68}$$

Sestrojování čar překročení průměrných průtoků za k-letí je pracné a může být zdrojem nepřesností. Jejich statistické parametry však lze odvodit z odhadu parametrů C_v, C_s souborů průměrných ročních průtoků.

Při vzájemné nezávislosti členů náhodné posloupnosti průměrných ročních průtoků [korelační funkce $r(\tau) = 0$ pro $\tau > 0; r(\tau = 0) = 1$] platí

$$C_v(k) = \frac{C_v}{\sqrt{k}}; \;\; C_s(k) = \frac{C_s}{\sqrt{k}} \tag{2.69}$$

Pokud $r(\tau) \neq 0$ (i pro $\tau > 0$), je nutno koeficient variace $C_v(k)$ stanovit ze vztahu

$$C_v(k) = \frac{C_v}{\sqrt{k}}\sqrt{1 + 2(r_1\frac{k-1}{k} + r_2\frac{k-2}{k} + r_3\frac{k-3}{k} + ...)} \tag{2.70}$$

a $C_s(k) : C_v(k) = C_s : C_v$".

Zanedbají-li se $r_2, r_3, ...$, platí

$$C_v(k) \doteq \frac{C_v}{\sqrt{k}}\sqrt{1 + 2r_1\,\frac{k-1}{k}} \tag{2.71}$$

Dospělo se k obecnějším výsledkům, jež respektují libovoné průtokové poměry. Reálná řada $Q_r = f(t)$ je využita pouze pro stanovení statistických charakteristik a korelační funkce, jež jsou považovány za odhad parametrů základního spouboru.

2.7.2 Metoda Krického a Menkela

Metoda Krického a Menkela spočívá dle Votruby a Brožy (1980) "jednak v oddělení intervalů let nutně poruchových a bezporuchových v čáře překročení průměrných ročních průtoků $Q_r = f(p)$, resp. ročních modulových součinitelů $k_r = f(p)$, jednak v podrobném rozboru intervalu, v němž může, nebo nemusí dojít k poruše v dodávce vody (intervalu podmínečně poruchových let)."

Dle Patery (2002) analyticky řešili víceletou složku zásobního objemu V_z^v nejdříve za předpokladu nezávislosti průměrných ročních průtoků a později použili mocninné autokorelační funkce:

$$r(\tau) = r(1)^\tau \tag{2.72}$$

2.7.3 Moranova metoda

Moranova metoda dle Votruba a Broža (1980) předpokládá průměrné roční průtoky jako stacionární a ergodickou náhodnou posloupnost. Musí se přihlédnout k naplnění na začátku roku, k velikosti přítoku a odběru.

Spojité rozdělení hledané pravděpodobnosti $V = f(P)$ při řešení nahradíme rozdělením diskrétním. Danou velikost zásobního objemu rozdělíme na $n - 2$ stejných dílů, přičemž využijeme jejich středních hodnot. Dále doplníme hodnotu $V_1 = 0$, která vyjadřuje úplné prázdnění, a V_n, jež je rovna zcela naplněnému zásobnímu objemu. "Každému intervalu $\triangle V_m$ přísluší pravděpodobnost výskytu $\triangle P_m$ a hodnotě V_m pravděpodobnost překročení P_m.

Pravděpodobnost překročení jistého konečného objemu V_j je *podmíněnou pravděpodobností* zahrnující pravděpodobnost výskytu počátečního naplnění, a také pravděpodobnost výskytu přítoku Q_i; odběr předpokládáme konstatní. Pro všechny hodnoty $V_1, V_2, ..., V_j, ..., V_n$

můžeme pravděpodobnosti překročení $P(V_j)$ vyjádřit soustavou rovnic(...)."Pomocí ní, čáry překročení a matic koeficientů (podrobný postup je dostupný v knize Votruba a Broža, 1980, str. 198 - 199) je možné dospět k hodnotám hledané pravděpodobnosti výskytu $\triangle P_k$ naplnění zásobního objemu V_k.

Patera (2002) popisuje jinými slovy stejný postup jako Votruba a Broža (1980).

Říkají, že ke stanovení víceleté složky jsou třeba průměrné roční přítoky Q_r a odběry O_r. Sezónní vyjadřuje nároky na zásobní objem vyplývající z proměnlivosti přítoku během roku.

Zmíněné vychází z polohy hydrologického roku, který obsahuje málovodná období na svém počátku i konci a vodné období je uzavřeno mezi nimi. Je proto vhodné řešit složku V_z^v ve vodohospodářských rocích zvolených tak, aby začínaly vodným a končily jedním málovodným obdobím.

Pro víceleté složky zásobního objemu nádrže bylo odvozeno analytické řešení, které vychází z pravděpodobnostních vlastností chronologické řady průměrných ročních průtoků. k vyřešení je třeba mít dáno poměrné nalepšení odtoku α a poměrnou víceletou složku zásobního objemu β_z^v, přičemž se hledá zabezpečení podle opakování P_o.

Postup řešení je takový, že se v jednotlivých krocích hledají přírůstky zabezpečenosti v čarách překročení daných průměrných ročních průtoků, poté jejich dvouletých klouzavých průměrů až po klouzavé průměry za k-letí, kdy už se nadále nezvyšuje zabezpečenost. Pokud nevyhovuje požadované (normované) hodnotě, musí se řešení zopakovat pro jiné volené β_z^v.

U analytického řešení je numericky velmi náročné především sestrojení čar překročení pro různá k-letí a iterace pro různé hodnoty β_z^v. Proto je možné tyto postupy použít pouze v případě, máme-li k dispozici pomocné diagramy, z nichž je možné rychle odečíst hodnoty $\beta_z^v = f(\alpha)$ a P_o pro dané statistické parametry řady Q_r.

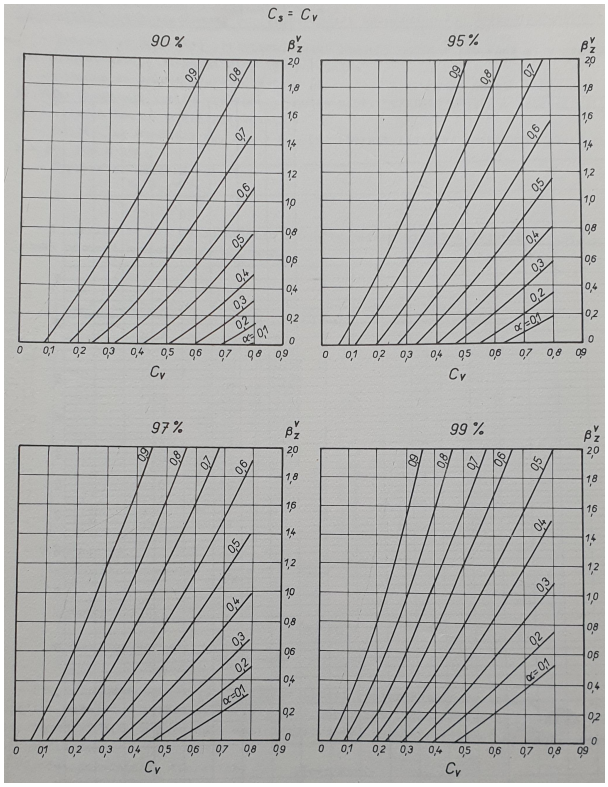
Na mocninnou autokorelační funkci Krického a Menkela viz rovnice (2.72) navázala řada autorů, kteří sestavili nomogramy pro určení poměrné vícelté složky zásobního objemu β_z^v ve tvaru:

$$\beta_z^v = f(\alpha, C_v, P_o) \tag{2.73}$$

Pro naše hydrologické podmínky je nejlepší autokorelační funkce odvozená Nacházelem (1965, 1973) určená vztahem vhodným pro povodí Labe:

$$r(\tau) = \frac{5}{3} r(1) e^{-0,1\tau} cos \frac{2\pi}{15}(\tau + 1) \tag{2.74}$$

Nacházelovy pomocné diagramy (obrázek 2.4) uvažují pro $r(\tau)$ tlumený harmonický pohyb ($r(1) = 0,3$). "Jejich použití umožňuje velmi pohotově stanovit jednu ze tří veličin α, β_z^v, P, jsou-li dány zbývající dvě při známých charakteristikách C_v, C_s a $r(\tau)$."Při neshodě zadaných veličin s grafy je možné určit výsledek pomocí interpolace. Grafy byly sestrojeny pro $C_s = C_v$, $C_s = 2C_v$ a $C_s = 3C_v$ v hodnotách $P = 90\%,\ 95\%,\ 97\%,\ 99\%$.



Obrázek 2.5: Nacházelovy diagramy - ukázka

Sezónní složka zásobního objemu se bere jako rozdíl celkové velikosti zásobního objemu a víceleté složky pro určenou zabezpečenost dodávky vody P.

$$V_z^s(O_p, p_2) = V_z(O_p, P) - V_z^v(O_p, P) \tag{2.75}$$

nebo v proměnných hodnotách

$$\beta_z^s(\alpha, p_2) = \beta_z(\alpha, P) - \beta_z^v(\alpha, P) \tag{2.76}$$

přičemž zabezpečenost samotné sezónní složky p_2 není sledována.

"V letech, kdy $Q_r \geq O_p$, je velikost víceleté složky nulová, takže $V_z \equiv V_z^s$ (...)."Sestrojí se součtová čára přítoku $\sum Q$ v hydrologickém roce.

Vypočte se počáteční část sezónní složky $poč\triangle V_z^s$, jejíž "velikost je dána největší nezápornou hodnotou K_p ze součtů:

$$V_k = \sum_{i=1}^{i=k} (O_p - Q_{m,i})\triangle t_i \tag{2.77}$$

kde k nabývá postupně hodnot 1, 2, ... až n (n je počet intervalů $\triangle z$ v roce).

$$poč\triangle V_z^s = K_p (= \max\{V_k\}) \tag{2.78}$$

Pokud všechny tyto součty jsou záporné, je $poč\triangle V_z^s = 0$.

Koncová část sezónní složky konc $\triangle V_z^s$ se také vypočte pomocí vzorce (2.48), ale hledá se záporný extrém s jeho absolutní hodnotou označenou K_n. Platí

$$\text{konc}\triangle V_z^s = K_n - \sum_{i=1}^{i=n}(Q_r - O_p)\triangle t_i = K_n - 31,6.10^6(Q_r - O_p)[m^3] \tag{2.79}$$

Vedle málovodných období na počátku, resp. na konci roku se mohou vyskytnout uzavřené málovodné sezóny uvnitř roku, které rovněž kladou nároky na sezónní složku." Stanove-ním *střední části sezónní složky* stř$\triangle V_z^s$ je zohledníme v řešení. Provedeme "postupnou sumaci hodnot $(O_p - Q_{m,i})\triangle t_i$ při splnění dalších podmínek:"

- pro zabránění záměně počáteční a střední části sezónní složky lze výpočet *stř*$\triangle V_z^s$ započít až po zjištění alespoň jedné záporné hodnoty $(O_p - Q_{m,i})$
- pokud při postupném sčítání narazíme na $\sum(O_p - Q_{m,i})\triangle t_i < 0$, uvažujeme nulu
- v každém roce určíme jedinou hodnotu *stř*$\triangle V_z^s$, a to jako maximum ze součtu $\sum(O_p - Q_{m,i})\triangle t_i$
- maximální hodnota $\sum(O_p - Q_{m,i})\triangle t_i$ nesmí být na konci roku - šlo by o záměnu s koncovou složkou. v takovém případě určíme jako hodnotu *stř*$\triangle V_z^s$ druhé lokální maximum, pokud neexistuje, *stř*$\triangle V_z^s = 0$.

"Po stanovení *poč*$\triangle V_z^s$, *konc*$\triangle V_z^s$ a *stř*$\triangle V_z^s$ v každém roce, jehož $Q_r \geq O_p$, můžeme sečíst vždy koncovou složku jednoho roku s počáteční složkou roku následujícího [$konc_z^s(t)$ + *poč*$\triangle V_z^s(t+1)$], přičemž pomineme v chronologické řadě roky s $Q_r < O_p$. Dostaneme tak soubor hodnot a z nich po uspořádání ve vzestupném pořadí a přiřazení pravděpodobností získáme empirickou čáru zabezpečení $V_z^s(1) = V_z(1) = f(p)$, vyjadřující nárok let s $Q_r \geq O_p$ na velikost sezónní složky zásobního objemu."

Z hodnot střední části sezónní složky zásobního objemu lze sestrojit čáru zabezpečení *stř*$\triangle V_z^s = f(p)$, jež se na konci řešení může použít ke korekci výsledků.

Zahrnutí vlivu sezónní složky na veliksot zásobního objemu ve víceletých málovodných obdobích je podstatně náročnější. Votruba a Broža (1980) popisují podrobný postup (str. 202 - 209).

2.7.4 Roční (sezónní) řízení odtoku

Votruba a Broža (1980) stanoví roční zásobní objem nádrže pomocí čáry zabezpečení nutných objemů - vychází z metody řešení víceletého řízení odtoku (viz výš). Při daných hodnotách odběru (odtoku) z nádrže O_p a návrhové zabezpečenosti podle opakování P_o by měl být výsledek řešení teoretický zásobní objem $V_z(P_o)$. v každém roce se určí jednotlivé části zásobního objemu stejným způsobem jako se stanovují jednotlivé části složky sezónní (viz "Sezónní složka zásobního objemu").

Při ročním řízení odpadá řešení víceletých málovodných období, tudíž zbývá vybrat směrodatné hodnoty $V_z(1)$ a *stř*$\triangle V_z$ pro sestrojení čáry zabezpečení nutných zásobních objemů $V_z = f(p)$. z ní se pro navrženou zabezpečenost P_o odečte velikost zásobního objemu $V_z(P_o)$.

2.7.5 Klemešova metoda

"V každém hydrologickém roce (...) se vypočtou hodnoty poč$\triangle V_z'$, konc$\triangle V_z'$ a stř$\triangle V_z'$. Postup výpočtu je stejný jako při řešení částí sezónní složky zásobního objemu v rocích s $Q_r > O_p$ (...) při víceletém řízení odtoku.

Hodnoty konc$\triangle V_z'$ jednoho roku se sečtou s poč$\triangle V_z'$ roku následujícího, čímž se získá soubor hodnot $V_z'(1)$, resp. čára zabezpečení $V_z'(1) = f(p)$."(Broža, 1981). Poté se vynesou empirické body do normální pravděpodobnostní sítě a proloží přímky $V_z'(1) = f(p)$ a stř$\triangle V_z' = f(p)$.

Klemešova metoda je vhodnější pro řešení s vyššími stupni nalepšení, kdy se režim nádrže blíží víceletému řízení odtoku (Broža, 1981).

2.7.6 Andrejanovova metoda

Jedná se o podstatně jednodušší metodu než je Klemešova. Řešení probíhá v reálné průtokové řadě průměrných měsíčních průtoků a sestává ze tří částí:

- sestrojení čáry zabezpečení sezónní složky zásobního objemu $V_z^s\ (P)$,
- sestrojení čáry zabezpečení víceleté složky zásobního objemu $V_z^v\ (P)$,
- sestrojení výsledné čáry zabezpečení $V_z\ (P)$.

Čára zabezpečení sezónní složky zásobního objemu "Abychom mohli vyloučit vodohospodářské roky, jejichž $Q_r(VR) < O_p$, provedeme nejprve výpočet průměrných ročních průtoků $Q_r(VR)$ za období od 1. IV. jednoho roku do 31. III. roku následujícího (...)."(Broža, 1981).

V letech, kdy $Q_r(VR) > O_p$ postupujeme stejně jako při postupně bilančním řešení (viz kap. 2.6), avšak nezávisle v každém vodohospodářském roce. Velikost sezónní složky v každém roce je dána maximální hodnotou součtu $V_k = \sum_1^k (O_p - Q_i)\triangle t_i$ při respektování podmínky, že $V_k \geq 0$.

Broža (1981) popisuje důležitost vhodného zvolení hranic vodohospodářských roků. "Ideální vodohospodářský rok by měl vodným obdobím a končit současně s koncem málovodného období."Dále pak, že vzhledem ke komplikovanosti říčních toků u nás se v letech, kdy $Q_r > O_p$, uzavřou málovodná období uvnitř roku. Doporučuje za začátek vodohospodářského roku zvolit první duben a vypočíst průměrné roční průtoky, v horských oblastech i první květen.

Zjednodušení spočívá v zanedbání vlivu let $Q_r < O_p$ při výpočtu sezónní složky. Nejdříve se tedy provede výpočet průměrných ročních průtoků $Q_r(VR)$ (v našich podmínkách je dle Votruba a Broža (1980) vhodné volit vodohospodářský rok od 1. v do 30. IV ± 1 měsíc). Následně se vyřadí roky, kdy $Q_r\ (VR) < O_p$. v letech $Q_r\ (VR) > O_p$ se s výpočtem pokračuje stejně jako při postupně bilanční metodě. Rozdílem je nezávislé řešení v každém vodohospodářském roce.

Čára zabezpečení víceleté složky zásobního objemu Pro stanovení čáry zabezpečení víceleté složky zásobního objemu je třeba z řady průměrných ročních průtoků vypočíst (dle Brožy (1981) metodou momentů) hodnoty $Q_a(VR), C_v$ a C_s. Vychází se z předpokladu stacionarity průtokového procesu, což umožňuje použití průměrných ročních průtoků k odhadu statistických parametrů. Dále se v rámci popisu struktury časové posloupnosti průměrných průtoků stanoví autokorelační funkce - pro naše hydrologické podmínky rovnice tlumeného harmonického pohybu.

Výsledná čára zabezpečení zásobního objemu je podrobně popsaná Brožou (1981).

2.8 Ztráty vody výparem

Votruba a Broža (1980) vyjadřují "rozdíl ve vodní bilanci E způsobený výparem a změnou v zásobě vody"pomocí vzorce:

$$E = E_v - E_p \pm \triangle W \tag{2.80}$$

kde E_v je výpar z vodní hladiny, E_p úhrnný výpar z území před zatopením (z půdy a transpirace) a $\triangle W$ změna zásoby vody.
"Změna W může ovlivnit vodní bilanci kratších ročních období. Střední roční zásoby vody se podstatně nemění, takže je lze zanedbat a psát

$$\overline{E} = \overline{E}_v - \overline{E}_p \tag{2.81}$$

Výpar $\overline{E}_p$ lze vyjádřit jako rozdíl srážek $\overline{X}$ a odtoku $\overline{Y}$ ze zátopového území, tedy

$$\overline{E}_p = \overline{X} - \overline{Y} \tag{2.82}$$

takže

$$\overline{E} = \overline{E}_v - (\overline{X} - \overline{Y}) \tag{2.83}$$

Je-li E za časový interval $\triangle t$ [s] vyjádřeno v metrech a označí-li se zvětšení vodní hladiny zátopou nádrže $\triangle F$ $[m^2]$, lze vyjádřit střední sekundovou změnu vodní bilance (ztrátou výparem) q $[m^3 s^{-1}]$ v intervalu $\triangle t$ výrazem

$$q = \frac{E.\triangle F}{\triangle t} \tag{2.84}$$

přičemž $\triangle F$ se mění podle stavu hladiny v nádrži."

Broža (1981) popisuje zjednodušený postup s jistým metodickým zpřesněním, kdy "je nutno stanovit:

- průměrnou plochu hladiny nádrže $\overline{F}$ za období prázdnění;
- dobu prázdnění nádrže t v rocích
- průměrný roční přírůstek výparu z plochy nádrže $\overline{H}_E$."

Zkonstruují se křivky charakteristiky nádrže obsahující čáru zatopených ploch $F = f(h)$ a čáru objemů $V = \Phi(h)$. z nich se vychází při určení průměrné plochy hladiny $\overline{F}$. Za předpokladu známé hodnoty objemu (A_s) a hladiny (M_s) prostoru stálého nadržení se na čáře objemů k hodnotě A_s přičte teoretický zásobní objem V_z, což ukáže předběžnou hladinu zásobního prostoru M'_z. Citem se odhadne průměrná hladina vody v nádrži, což odpovídá vyprázdnění V_z zhruba 60 - 65 % a přičte se k V_s. Poté se z křivek charakteristiky nádrže odečte hodnota úrovně hladiny a zatopené plochy odpovídající hodnotě $V_s + (0,6 \sim 0,65)V_z$.

Dle metodicky přesného řešení se do ztrát výparem nemají zavádět hodnoty výparu z vodní hladiny, ale pouze přírůstek výparu z plochy nádrže. Ten je daný rozdílem výparu z vodní hladiny a původního výparu před zbudováním nádrže. "V původním stavu lze průměrnou výšku výparu vyjádřit vztahem

$$\overline{h}'_E = \overline{h}_s(1 - \varphi) \tag{2.85}$$

kde
$\overline{h}_s$ je průměrná srážková výška na plochu nádrže
φ - součinitel odtoku z plochy nádrže."Pak platí:

$$\overline{H}_E = \overline{h}_E - \overline{h}'_E \tag{2.86}$$

a

$$Z_v = \overline{H}_E.\overline{F}.t \tag{2.87}$$

Stejný přístup k řešení ztrát výparem má Patera (2002).

Starý (2006) popisuje ztrátu výparem tak, že "vyplývá ze změny povrchu území ve vodní hladinu. Rozdíl ve vodní bilanci E způsobený výparem je možno v průměru za rok (nebo určitá delší období) vyjádřit vztahem

$$E = E_v - E_p \ \ [m.rok^{-1}] \tag{2.88}$$

kde E_v je výpar z vodní hladiny a E_p je úhrnný výpar z území před zatopením (z půdy a transpirace), který je možno stanovit jako rozdíl ročního úhrnu srážek S a ročního povrchového odtoku O ze zátopového území:

$$E_p = S - O \tag{2.89}$$

pro

$$O = \varphi.S \tag{2.90}$$

kde φ je koeficient povrchového odtoku. Po dosazení (2.85) do (2.84) získáme vztah

$$E_p = S\,(1 - \varphi) \tag{2.91}$$

Výpar E_v z volné hladiny za rok je určen v závislosti na nadmořské výšce a jeho zabezpečenosti (...).

Střední sekundovou změnu bilance (ztrátou výparem) q [m^3 s $^{-1}$] vypočteme ze vztahu

$$q = \frac{E.\triangle F}{\triangle t} \tag{2.92}$$

přičemž změna plochy hladiny je dána změnou plnění nádrže v časovém intervalu $\triangle t$."

Kapitola 3

Metody výpočtu

Kapitola podrobněji rozebere některé vybrané metody výpočtu používané v zahraničí nebo v České republice, které byly rozpracovány v bakalářské práci do formy praktické aplikace a porovnání metod. Jedná se o simulační metody.

3.1 Zahraničí

3.1.1 Sekvenční špičkový algoritmus dle McMahona & Adeloye (2005)

Z knihy od McMahona & Adeloye (2002) bude rozebrán podrobněji postup základího SPA.

Tabulka 3.1: Ukázka výpočtu McMahon & Adeloye (2005)

		1	2	3	4
měsíc	i	Q_t [$m^3.s^{-1}$]	D_t[$m^3.s^{-1}$]	(K_t+ D_t - Q_t) [$m^3.s^{-1}$]	K_{t+1} [$m^3.s^{-1}$]
	0	0	0	0	0
11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000
12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000
1	3	2.403	2.580	0.177	0.177
2	4	6.477	2.580	-3.719	0.000
3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000
4	6	2.105	2.580	0.475	0.475
5	7	1.937	2.580	1.119	1.119
6	8	0.625	2.580	3.074	3.074
7	9	0.974	2.580	4.680	4.680
8	10	0.642	2.580	6.619	6.619
9	11	0.711	2.580	8.488	8.488
10	12	0.814	2.580	10.254	10.254

Sloupec 1 čítá hodnoty přítoku do nádrže a sloupec 2 odtok z nádrže. Čtvrtý sloupec značí úsekový deficit v čase $t + 1$. Ve třetím sloupci probíhá výpočet $K_t + D_t - Q_t$. Podmínkami výpočtu K_{t+1} jsou:

- když hodnota ve sloupci $3 < 0$, ve sloupci 4 je zapsáno 0.000
- když hodnota ve sloupci $3 > 0$, ve sloupci 4 je zapsán součet hodnot ze třetího a $i - 1$ řádku ve sloupci 4

- výpočet vychází ze zpočátku plné nádrže.

Pro získání hodnoty zásobního objemu nádrže se hledá maximální hodnota vyprázdnění nádrže, které je třeba přenásobit $\triangle t$.

V tabulkovém editoru byl použit vzorec:

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1					α	0.8			
2		rok	měsíc	t	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	Q_o [$m^3.s^{-1}$]		V_z [$m^3.s^{-1}$]	
3					Q_t	D_t	$K_t+D_t-Q_t$	K_{t+1}	
4				0	0	0	0	0	
5			11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000	
6			12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000	
7			1	3	2.403	2.580	0.177	0.177	
8			2	4	6.477	2.580	-3.719	0.000	
9			3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000	
10		1950	4	6	2.105	2.580	0.475	=KDYŽ((V10)>0;(V10);0)	
11			5	7	1.937	2.580	1.119	1.119	
12			6	8	0.625	2.580	3.074	3.074	
13			7	9	0.974	2.580	4.680	4.680	
14			8	10	0.642	2.580	6.619	6.619	
15			9	11	0.711	2.580	8.488	8.488	
16			10	12	0.814	2.580	10.254	10.254	

Obrázek 3.1: Podmínka výpočtu - McMahon & Adeloye (2005)

3.1.2 Sekvenční špičkový algoritmus dle Jain (2003)

Jain (2003) také uvádí výpočet pomocí SPA, tudíž je rozebrán pro možnost srovnání. Neliší se od SPA od McMahona Adeloye kromě jednotek, ve kterých je výpočet prováděn, v ničem.

Tabulka 3.2: Ukázka výpočtu Jain (2003)

		1	2	3
měsíc	i	I_t [m^3]	R_t[m^3]	S_t [m^3]
	0	0	0	0
11	1	8968300	6786245	0
12	2	8076730	6786245	0
1	3	6319890	6786245	466355
2	4	17034510	6786245	0
3	5	8174040	6786245	0
4	6	5536150	6786245	1250095
5	7	5094310	6786245	2942030
6	8	1643750	6786245	8084526
7	9	2561620	6786245	12309151
8	10	1688460	6786245	17406937
9	11	1869930	6786245	22323252
10	12	2140820	6786245	26968678

I_t ve sloupci 1 značí přítok do nádrže, R_t ve sloupci 2 odtok z nádrže a S_t zásobní objem v čase t. Sloupec 3 je počítán za následujících podmínek:

- pokud je $S_{t-1} + R_t - I_t$ větší než 0, zapisuje se do sloupce 3 tato hodnota

- pokud je naopak menší než 0, považuje se za výsledek ve 3. sloupci 0
- počáteční podmínkou je plná nádrž.

Hledá se opět hodnota největšího vyprázdnění nádrže. Vzorec pro výpočet použitý v tabulkovém editoru:

	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1					α	0.8					
2		rok	měsíc	t	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	Q_p [m^3]	$Q_{m,i}$ [m^3]	Q_p [m^3]	V_z [m^3]		
3					Q_t	R_t Release	I_t Inflow	R_t Release	S_t Storage		
4				0	0	0	0	0	0		
5			11	1	3.410	2.580	8968300	6786245	0		
6			12	2	3.071	2.580	8076730	6786245	0		
7			1	3	2.403	2.580	6319890	6786245	466355		
8			2	4	6.477	2.580	17034510	6786245	0		
9			3	5	3.108	2.580	8174040	6786245	0		
10		1950	4	6	2.105	2.580	5536150	6786245	=KDYŽ((Y10-X10+Z9)>0;(Z9+Y10-X10);0)		
11			5	7	1.937	2.580	5094310	6786245	2942031		
12			6	8	0.625	2.580	1643750	6786245	8084526		
13			7	9	0.974	2.580	2561620	6786245	12309152		
14			8	10	0.642	2.580	1688460	6786245	17406937		
15			9	11	0.711	2.580	1869930	6786245	22323253		
16			10	12	0.814	2.580	2140820	6786245	26968678		

Obrázek 3.2: Podmínka výpočtu - Jain (2003)

3.2 Česká republika

3.2.1 Úloha typu A.1 dle Starého (2006)

Úloha je řešena jako jednorázová simulace provozu nádrže. Časový krok $\triangle t$ je vhodné volit jako 1 měsíc ($= 2,63.10^6$). Počáteční podmínkou pro výpočet je plná nádrž. v každém měsíci je postupně provedena bilance mezi požadovaným nalepšeným odtokovým množstvím O_p, $\triangle t$ a přítokovým množstvím Q. $\triangle t$.

Tabulka 3.3: Ukázka výpočtu Starý (2006)

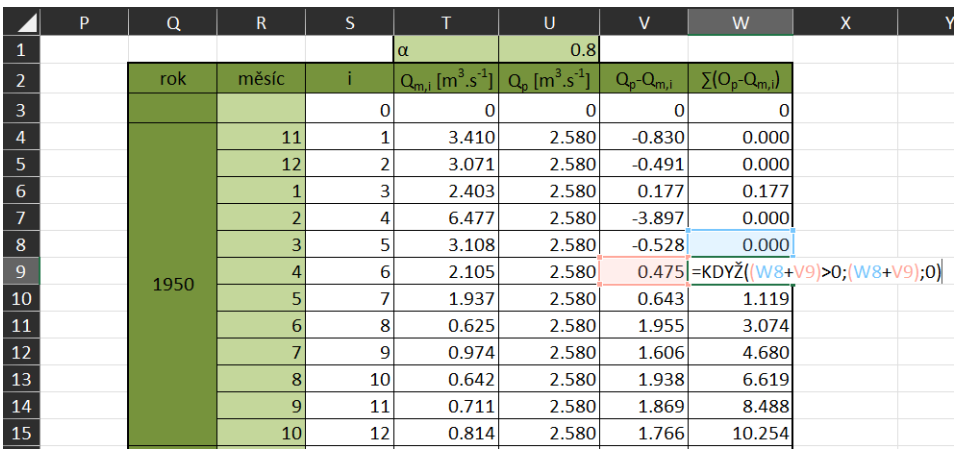
		1	2	3	4
měsíc	i	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	O_p[$m^3.s^{-1}$]	O_p-$Q_{m,i}$[$m^3.s^{-1}$]	$\sum(O_p\text{-}Q_{m,i})$ [$m^3.s^{-1}$]
	0	0	0	0	0
11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000
12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000
1	3	2.403	2.580	0.177	0.177
2	4	6.477	2.580	-3.896	0.000
3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000
4	6	2.105	2.580	0.475	0.475
5	7	1.937	2.580	0.643	1.119
6	8	0.625	2.580	1.955	3.074
7	9	0.974	2.580	1.606	4.680
8	10	0.642	2.580	1.938	6.619
9	11	0.711	2.580	1.869	8.488
10	12	0.814	2.580	1.766	10.254

Sloupec 1 znázorňuje přítok do nádrže a sloupec 2 odtok z nádrže pro $alpha = 0.8$. Sloupec 3 ukazuje rozdíl mezi odtokem přítokem. Ve sloupci č. 4 probíhá sumace za podmínek:

- pokud je součet i-tého kroku ve sloupci 3 s $i - 1$ ve sloupci 4 < 0, píšeme 0.
- Zpočátku je uvažována plná nádrž.

Pro zjištění výsledku zásobního objemu V_z hledáme maximální hodnotu vyprázdnění nádrže.

Výsledné maximum je třeba přenásobit $\triangle t$.



	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1					α	0.8				
2		rok	měsíc	i	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	Q_p [$m^3.s^{-1}$]	Q_p-$Q_{m,i}$	$\sum(O_p\text{-}Q_{m,i})$		
3				0	0	0	0	0		
4			11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000		
5			12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000		
6			1	3	2.403	2.580	0.177	0.177		
7			2	4	6.477	2.580	-3.897	0.000		
8			3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000		
9		1950	4	6	2.105	2.580	0.475	=KDYŽ((W8+V9)>0;(W8+V9);0)		
10			5	7	1.937	2.580	0.643	1.119		
11			6	8	0.625	2.580	1.955	3.074		
12			7	9	0.974	2.580	1.606	4.680		
13			8	10	0.642	2.580	1.938	6.619		
14			9	11	0.711	2.580	1.869	8.488		
15			10	12	0.814	2.580	1.766	10.254		

Obrázek 3.3: Podmínka výpočtu - Starý (2006)

3.2.2 Přímé řešení dle Patery (2002)

Používají přímé řešení zásobního objemu nádrže. Podmínkou řešení je jasně daný odběr z nádrže v každém kroku řešení a určení zabezpečenosti. Výpočet probíhá postupnou sumací bilančního deficitu.

Tabulka 3.4: Ukázka výpočtu Patera (2002)

		1	2	3	4
měsíc	i	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	O_p[$m^3.s^{-1}$]	$\triangle V_i$ [$m^3.s^{-1}$]	V_k [$m^3.s^{-1}$]
	0	0	0	0	0
11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000
12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000
1	3	2.403	2.580	0.177	0.177
2	4	6.477	2.580	-3.897	0.000
3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000
4	6	2.105	2.580	0.475	0.475
5	7	1.937	2.580	0.643	1.119
6	8	0.625	2.580	1.955	3.074
7	9	0.974	2.580	1.606	4.680
8	10	0.642	2.580	1.938	6.619
9	11	0.711	2.580	1.869	8.488
10	12	0.814	2.580	1.766	10.254

Na začátku výpočtu je odhadem zvolen zásobní objem nádrže V_z a samotný výpočet probíhá za podmínek:

a. pokud $V_k < 0$, nádrž je plná, přebytečný přítok odtéká jalově a v daném kroku uvažujeme $V_k = 0$, v dalším kroku výpočtu V_{k+1} použijeme tuto hodnotu

b. pokud $V_k > V_z$, nádrž je prázdná a pro výpočet uvažujeme $V_k = V_z$, odtéká totiž pouze přítok. s touto hodnotou se počítá v následujícím kroku k+1. Došlo tak k poruše dodávky vody vzhledem k tomu, že nebyl zabezpečen celý plánovaný odběr O_i.

- pokud $V_k < 0$, nádrž je plná, přebytečný přítok odtéká jalově a v daném kroku uvažujeme $V_k = 0$, v dalším kroku výpočtu V_{k+1} použijeme tuto hodnotu
- pokud $V_k > V_z$, nádrž je prázdná a pro výpočet uvažujeme $V_k = V_z$, odtéká totiž pouze přítok. s touto hodnotou se počítá v následujícím kroku k+1
- výpočet vychází z prázdné nádrže.

Pro určení velikosti zásobního objemu se hledá největší vyprázdnění nádrže.

	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AJ	AK	AL	AM	AN
1					α	0.8							
2		rok	měsíc	i	$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	Q_p [$m^3.s^{-1}$]	Q_p-$Q_{m,i}$ [$m^3.s^{-1}$]	V_z [m^3]					
3				0	0	0	0						
4			11	1	3.410	2.580	-0.830	0.000					
5			12	2	3.071	2.580	-0.491	0.000					
6			1	3	2.403	2.580	0.177	0.177					
7			2	4	6.477	2.580	-3.897	0.000					
8			3	5	3.108	2.580	-0.528	0.000					
9		1950	4	6	2.105	2.580	0.475	0.475					
10			5	7	1.937	2.580	0.643	=KDYŽ(AG10+AH9<0;0;KDYŽ(AG10+AH9>F1;F1;AG10+AH9))					
11			6	8	0.625	2.580	1.955	3.074					
12			7	9	0.974	2.580	1.606	4.680					
13			8	10	0.642	2.580	1.938	6.619					
14			9	11	0.711	2.580	1.869	8.488					
15			10	12	0.814	2.580	1.766	10.254					

Obrázek 3.4: Podmínka výpočtu - Patera (2002)

3.2.3 Postupně bilanční metoda dle Brožy (1993)

Postup výpočtu je poměrně jednoduchý. Názorná ukázka výpočtu:

Tabulka 3.5: Ukázka výpočtu Broža (1993)

		1	2	3	4
měsíc	i	P_i [$m^3.s^{-1}$]	O_i[$m^3.s^{-1}$]	P_i-O_i [$m^3.s^{-1}$]	$\sum(P_i\text{-}O_i)$ [$m^3.s^{-1}$]
	0	0	0	0	0
11	1	3.410	2.580	0.830	0.000
12	2	3.071	2.580	0.491	0.000
1	3	2.403	2.580	-0.177	-0.177
2	4	6.477	2.580	3.897	3.719
3	5	3.108	2.580	0.528	0.000
4	6	2.105	2.580	-0.475	-0.475
5	7	1.937	2.580	-0.643	-1.119
6	8	0.625	2.580	-1.955	-3.074
7	9	0.974	2.580	-1.606	-4.680
8	10	0.642	2.580	-1.938	-6.619
9	11	0.711	2.580	-1.869	-8.488
10	12	0.814	2.580	-1.766	-10.254

kde 1. sloupec představuje přítok do nádrže (ekv. $Q_{m,i}$), 2. odtok z nádrže (ekv. O_p), 3. rozdíl přítoku a odtoku z nádrže a 4. postupnou sumaci rozdílů. Sumace byla v tabulkovém editoru spočítána za pomoci podmínky. Pokud je suma i-tého kroku záporná, pokračuje s tímto číslem v kroku $i + 1$. v momentě dosažení hodnoty větší než 0 ve sloupci č. 4 je výpočet "pozastaven" a nepřetržité následující měsíce, jež mají kladný rozdíl hodnot P_i a O_i jsou ze sumace vynechány. Znovu se začíná sumovat u nejbližší záporné hodnoty rozdílu a postup se opakuje. Nakonec se hledá nejmenší hodnota ve sloupci 4, která bude představovat velikost zásobního objemu. Při počítání v $[m^3s^{-1}]$ výsledky přenásobíme hodnotou t [s], jež je počet sekund za časový krok (v tomto případě měsíc, tj. $2{,}63.10^6$). Zpočátku se předpokládá prázdná nádrž, bude tedy probíhat plnění.

Výpočet v tabulkovém editoru proběhl za použití podmínky:

Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
				α	0.8								
			1	2	3	4							
rok	měsíc	i	P_i [$m^3.s^{-1}$]	O_i [$m^3.s^{-1}$]	P_i-O_i [$m^3.s^{-1}$]	∑(P_i-O_i) [$m^3.s^{-1}$]							
		0	0	0	0								
	11	1	3.410	2.580	0.830	=KDYŽ((AF4+AE5)<0;(AF4+AE5);KDYŽ((AF4+AE5)>0;KDYŽ((AF4<0);(AF4+AE5);0);CHYBA))							
	12	2	3.071	2.580	0.491	0.000							
	1	3	2.403	2.580	-0.177	-0.177							

Obrázek 3.5: Podmínka výpočtu - Broža (1993)

Kapitola 4

Praktická aplikace

4.1 Obecné informace

Vírská přehrada leží v obci Vír, okrese Žďár nad Sázavou a kraji Vysočina. Nachází se na toku řeky Svratky na rozhraní Žďárských vrchů a Nedvědické vrchoviny. Sestává ze dvou vodních nádrží, Vír I a o několik kilometrů níže po proudu řeky Vír II. v nejužším místě hradí údolí a hráz samotná je na obou krajích ukotvena ve skalních stěnách. Do provozu byla uvedena v roce 1957. v důsledku výstavby přehrady zanikla pod vodou vesnice Chudobín a část Korouhvic. Kvůli významnému vodárenskému využití je bezprostřední okolí přehrady v ochranném pásmu I. stupně, tudíž je zde zakázaná rekreace a rybolov. Po pravém břehu je však zbudována stezka vedoucí do Dalečína.

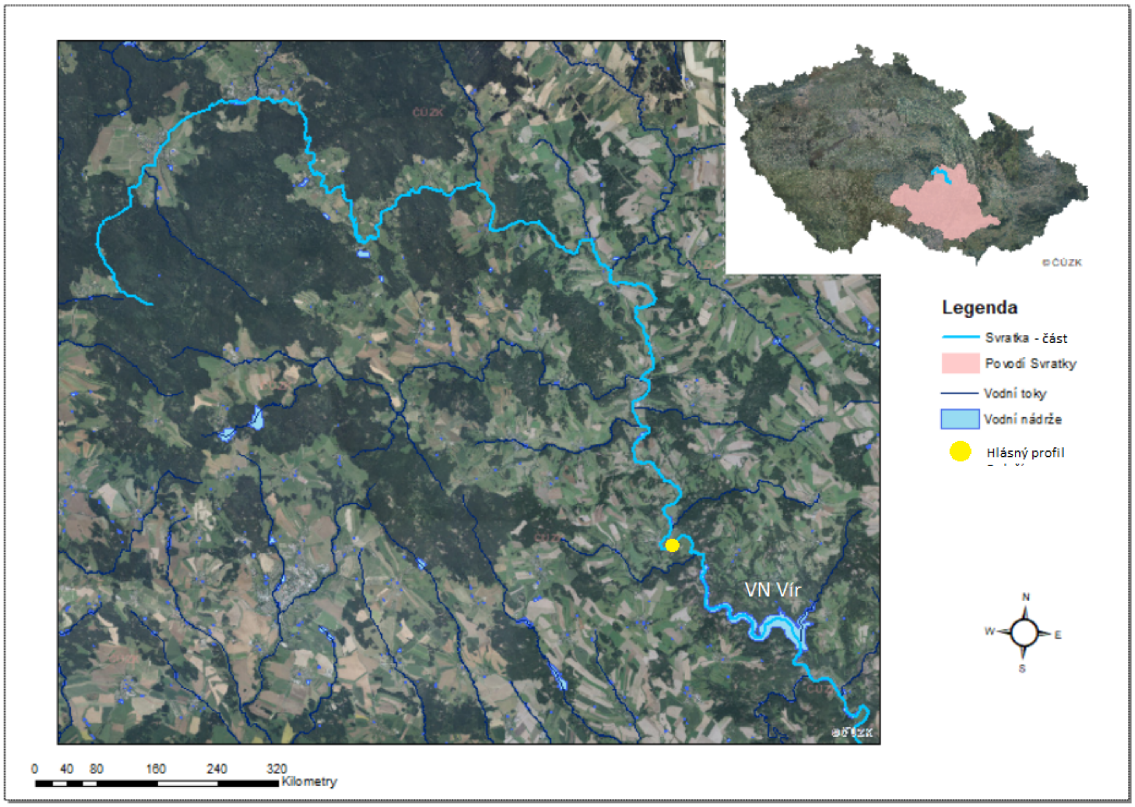
Svratka se nachází v Povodí Moravy. Je největším levobřežním přítokem Dyje. Pramení severně od Žďáru nad Sázavou u obce Cikháj na jihozápadním úbočí Žákovy hory. Poté pokračuje severovýchodním směrem k obci Borovnice a dále směrem jihovýchodním k Brnu. Pod Brnem vtéká do nížinné oblasti Dyjskosvrateckého úvalu.

Kromě Vírské přehrady na ní stojí také přehrada Brněnská. v posledních letech se v řece objevuje problém znečištění fosforem, jež je příčinou eutrofizace vod v obou zmíněných nádržích.

Nejbližší hlásný profil je č. 371, stanice Dalečín v obci Dalečín. Provozovatelem je ČHMÚ pobočka Brno. Profil leží na řece Svratce ve staničení 118,01 km. Plocha povodí je 366,936 km^2, nula vodočtu ve 470,07 m n. m. Evidován pod číslem hydrologického pořadí 4-15-01-0330-0-00. Průměrný roční stav je 75 cm a průměrný roční průtok 3,444 m^3s^{-1}.

Tabulka 4.1: N-leté průtoky hlásného profilu č. 371, Dalečín

N-leté průtoky:	Q_1	Q_2	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
$[m^3s^{-1}]$	39,7	73,5	91,2	139	162



Obrázek 4.1: Mapa řeky a povodí Svratky, VN Vír a hlásného profilu Dalečín

Vodní dílo Vír I leží na 114,90 km řeky Svratky. Správcem je Povodí Moravy, závod Dyje. Hlavním účelem je akumulace vody pro vodárenské odběry. Vodu zde odebírají Skupinové vodovody Bystřice nad Pernštejnem a Žďár nad Sázavou a Brněnský oblastní vodovod. Dále zajištění trvalého minimálního průtoku, nalepšení průtoků pro energetické využití ve špičkové vodní elektrárně Vír I, odběr provozní vody pod nádrží, nalepšení průtoků pro závlahy pod Brnem (ve spolupráci s nádrží Brno) a snížení povodňových průtoků.

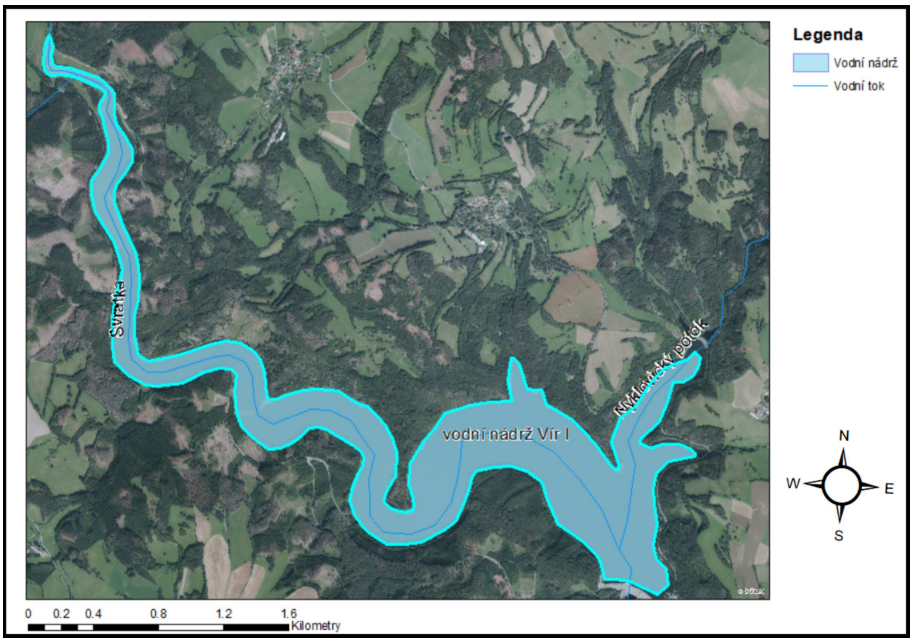
Betonová gravitační hráz je vysoká 66,20 m nade dnem. v koruně je 9,00 m široká a 390,0 m dlouhá s kótou koruny 470,45 m n. m.

Přehradní těleso disponuje dvěma spodními výpustmi o průměru 1800 mm, jejichž kapacita při maximálním průtoku je dvakrát 40,0 m^3/s. Provozní uzávěr je rozstřikovací. Asanační výpust je zde jedna o průměru 200 mm s kapacitou při maximální zásobní hladině 0,5 m^3/s.

Bezpečnostní přeliv byl zvolen korunový nehrazený. Sestává z pěti polí a délka přelivu je 12,1 m. Kóta přelivu je 467,05 m n. m. Kapacita bezpečnostního přelivu při maximální hladině je 180,5 m^3/s.

Na pravém břehu pod stěnou hráze se nachází vodní elektrárna, jejímž provozovatelem je E-ON, a.s. Voda je do ní přiváděna dvěma tlakovými ocelovými přivaděči o průměru 2200 mm. Ty jsou zabetonované do bloků hráze. Na přivaděče navazují dvě Francisovy turbíny. Výkon elektrárny je 6,0 a 1,15 MW. Hltnost je 12,0 a 2,1 m^3/s. Spodní výpusti rovněž prochází elektrárnou.

Nádrž poskytuje neškodný odtok 55,000 m^3/s a minimální odtok 0,530 m^3/s.



Obrázek 4.2: Mapa VD Vír

Obrázek 4.3: VN Vír I, obec Vír a VN Vír II

Tabulka 4.2: Podrobné technické údaje o nádrži Vír I (VD Vír, 2021)

Stálé nadržení:	3,800 mil. m^3
Hladina stálého nadržení:	421,45 m n. m.
Zásobní prostor:	44,056 mil. m^3
Hladina zásobního prostoru:	464,45 m n. m.
Prostor retenční ovladatelný:	5,286 mil. m^3
Hladina retenčního ovladatelného prostoru:	467,05 m n. m.
Prostor retenční neovladatelný:	3,051 mil. m^3
Hladina retenčního neovladatelného prostoru:	468,45 m n. m.
Celkový objem:	56,193 mil. m^3
Zatopená plocha:	223,60 ha

Obrázek 4.4: Hráz Vír I (Okolo Vírské přehrady, nedatováno)

4.2 Data použitá ve výpočtech

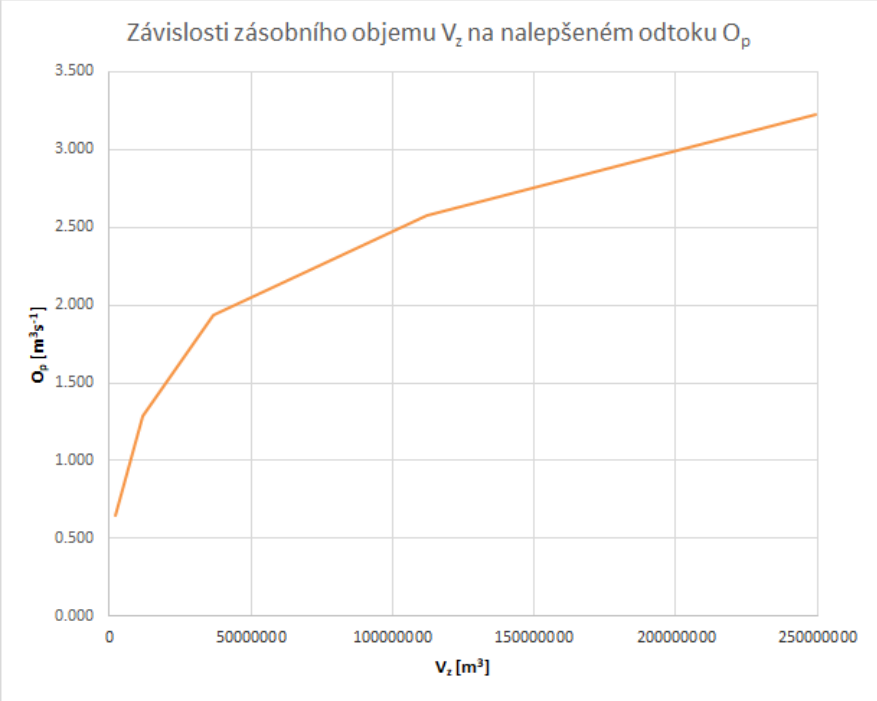
Pro výpočty byla použita reálná průtoková řada průměrných měsíčních průtoků měřených v profilu Dalečín na řece Svratka. Délka záznamu je 70 let (1950 - 2020). Data jsou z ČHMÚ. Průměrný průtok byl vypočítán aritmetickým průměrem z celé průtokové řady, $Q_a = 3,225 m^3 s^{-1}$. Dále byl dán součinitel nalepšení $\alpha = 0,2 - 1,0$. Nalepšený odtok, jež byl jediným a konstantním odběrem z nádrže, byl stanoven:

$$O_p = \alpha . Q_a \tag{4.1}$$

Výpočet dle Brožy (1993) vynesl následující výsledky:

Tabulka 4.3: Výsledky výpočtu zásobního objemu dle Brožy (1993)

α	Q_a [$m^3.s^{-1}$]	MAX [$m^3.s^{-1}$]	V_z [m^3]
0.2	3.225	0.726	1910546
0.4	3.225	4.406	11587773
0.6	3.225	13.912	36587455
0.8	3.225	42.639	112139685
1.0	3.225	94.922	249645257

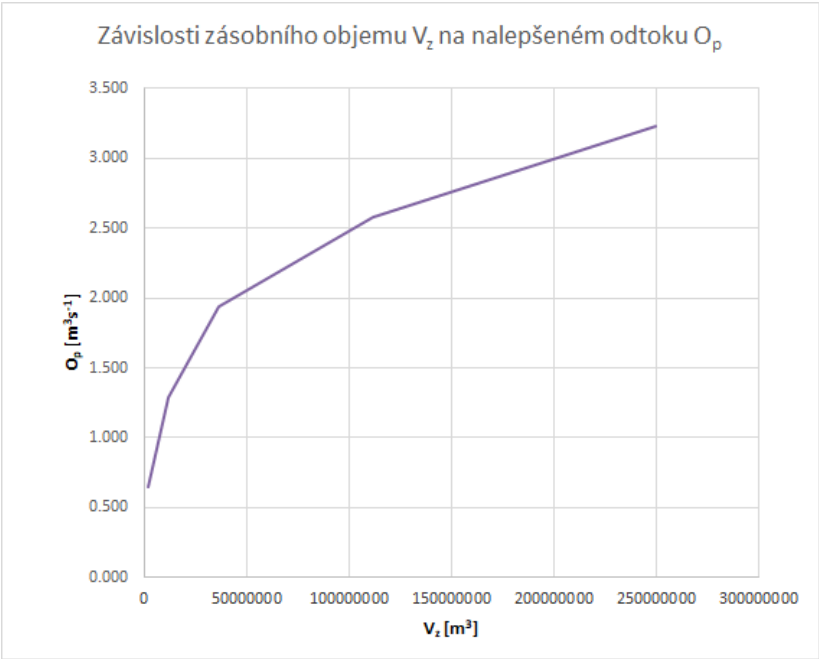


Obrázek 4.5: Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Borže (1993)

Výpočet dle Patery (2002) vynesl následující výsledky:

Tabulka 4.4: Výsledky výpočtu zásobního objemu dle Patery (2002)

α	Q_a [$m^3.s^{-1}$]	MAX [$m^3.s^{-1}$]	V_z[m^3]
0.2	3.225	0.726	1910546
0.4	3.225	4.406	11587773
0.6	3.225	13.912	36587455
0.8	3.225	42.639	112139685
1.0	3.225	94.922	249645257

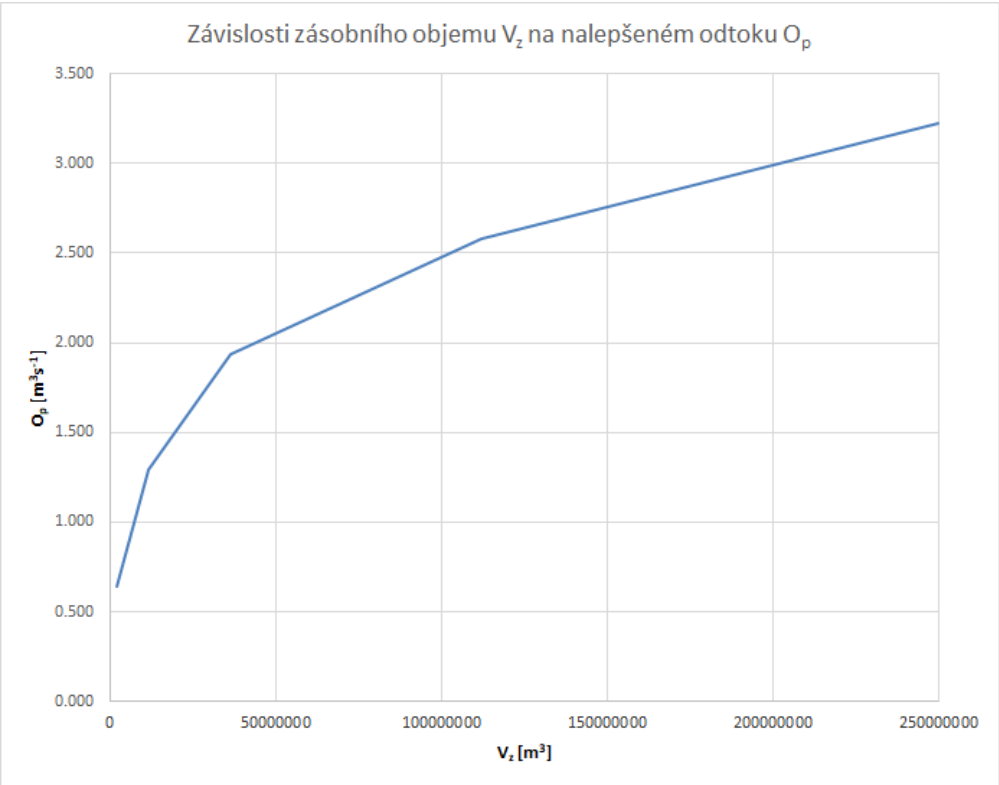


Obrázek 4.6: Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Patery (2002)

Výpočet dle Starého (2006) vynesl následující výsledky:

Tabulka 4.5: Výsledky výpočtu zásobního objemu dle Starého (2006)

α	Q_a [$m^3.s^{-1}$]	MAX [$m^3.s^{-1}$]	V_z[m^3]
0.2	3.225	0.726	1910546
0.4	3.225	4.406	11587773
0.6	3.225	13.912	36587455
0.8	3.225	42.639	112139685
1.0	3.225	94.922	249645257

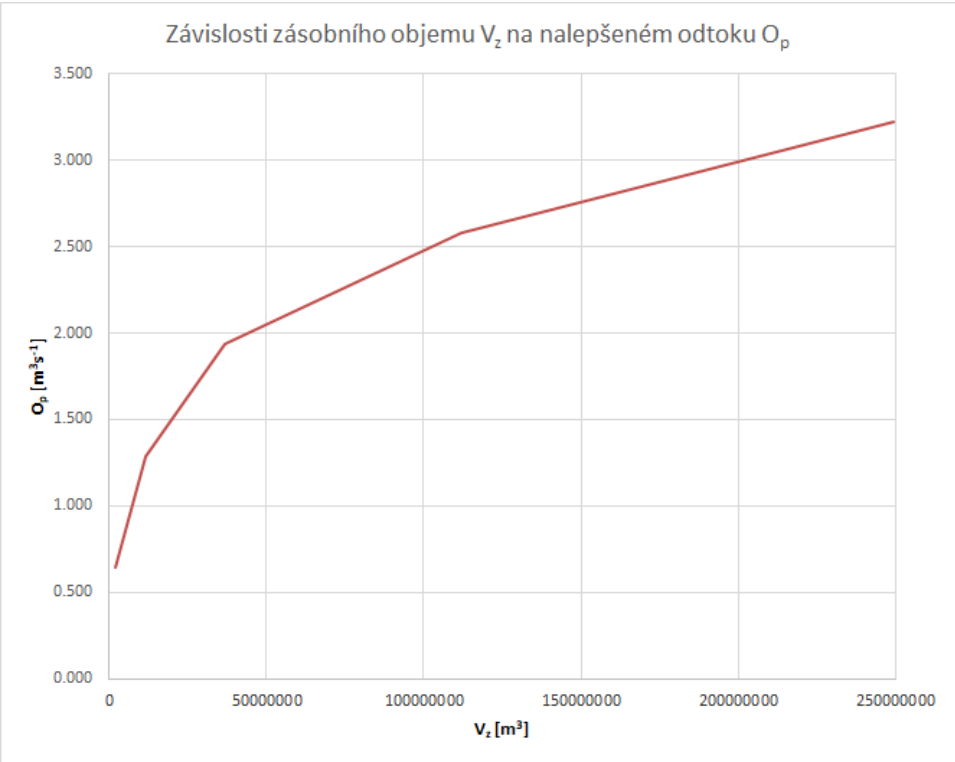


Obrázek 4.7: Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Starého (2006)

Výpočet dle McMahona & Adeloye (2005) vynesl následující výsledky:

Tabulka 4.6: Výsledky výpočtu zásobního objemu dle McMahona & Adeloye (2005)

α	Q_a [$m^3.s^{-1}$]	MAX [$m^3.s^{-1}$]	V_z[m^3]
0.2	3.225	0.726	1910546
0.4	3.225	4.406	11587773
0.6	3.225	13.912	36587455
0.8	3.225	42.639	112139685
1.0	3.225	94.922	249645257

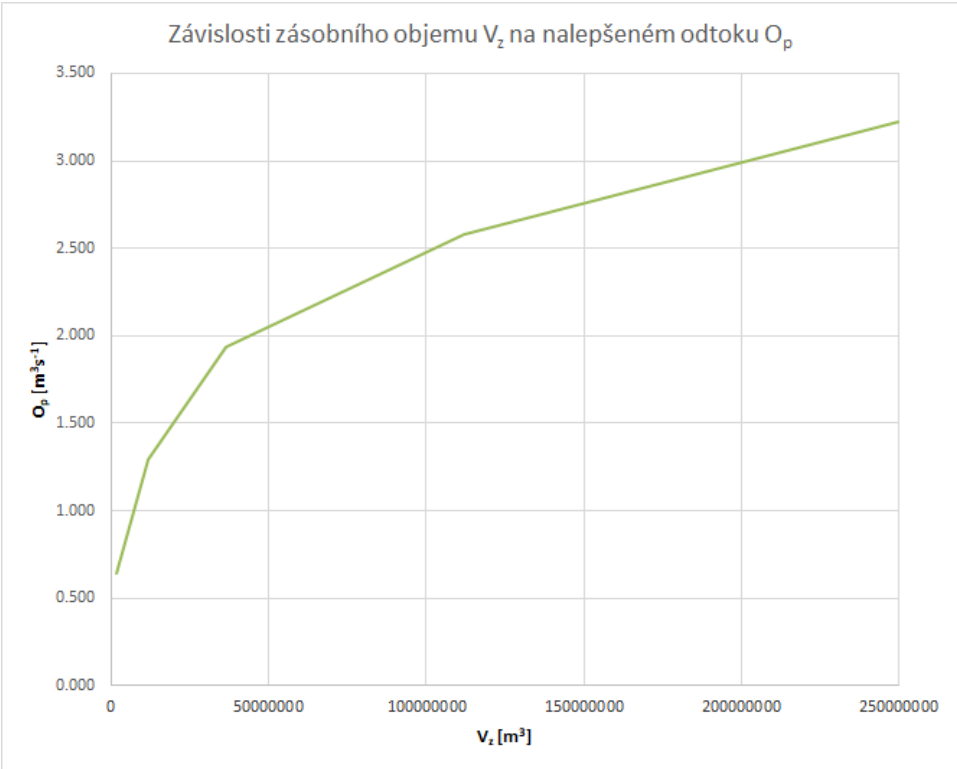


Obrázek 4.8: Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle McMahona & Adeloye (2005)

Výpočet dle Jaina (2003) vynesl následující výsledky:

Tabulka 4.7: Výsledky výpočtu zásobního objemu dle Jaina (2003)

α	Q_a [$m^3.s^{-1}$]	MAX = V_z[m^3]
0.2	3.225	1910546
0.4	3.225	11587773
0.6	3.225	36587455
0.8	3.225	112139685
1.0	3.225	249645257



Obrázek 4.9: Závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku O_p dle Jaina (2003)

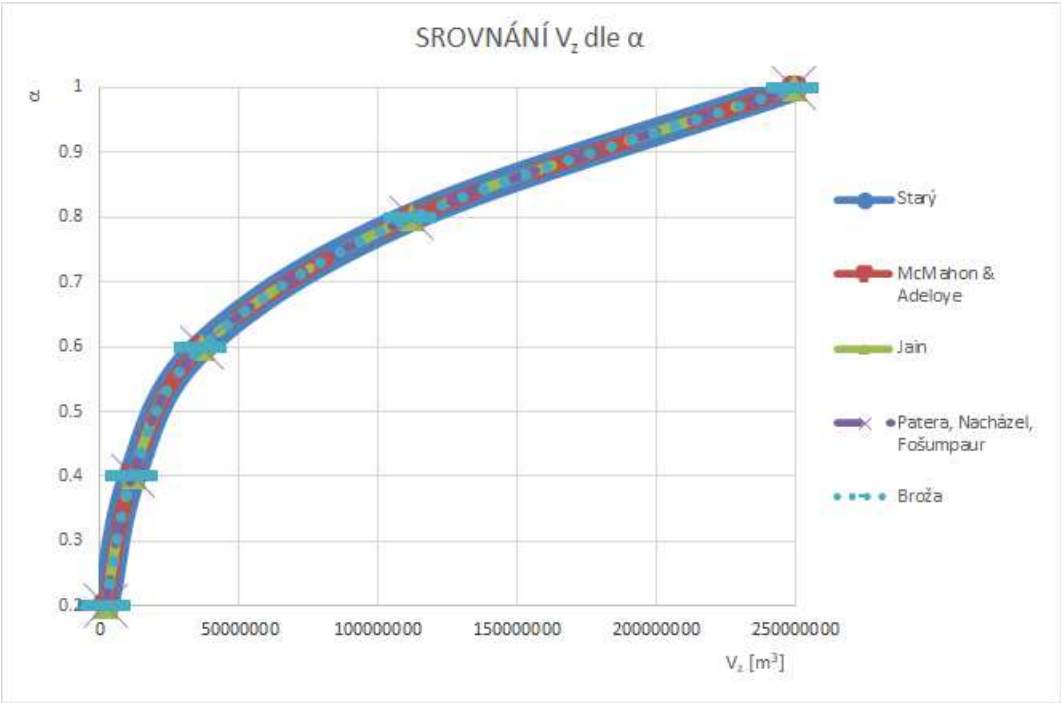
Kapitola 5

Shrnutí a srovnání

Postupy řešení pěti vybraných výpočtů se lišily převážně v počátečních podmínkách, kdy nastal rozdíl v prázdnění či plnění nádrže. Pro získání velikosti zásobního objemu se hledaly maxima prázdnění nebo plnění.

Dle Starého (2006) se počítalo nejjasněji vzhledem k detailnímu rozepsání postupu. Nápodobně vypadala detailnost popisu v knize od McMahona & Adeloye. Patera (2002) má rovněž dobře zpracovaný popis postupu výpočtu, ale z mého pohledu nastala nejasnost ve volbě V_z k výpočtu. Jain (2003) poskytl pouze podmínky určení S_t, kde však zahrnul vzorec pro dílčí výpočty. Zbytek postupu nebyl jasně řečen, i přesto však bylo možné počítat bez větších obtíží. Broža (1993) měl nejméně rozepsaný popis. Vycházelo se pouze z názorné ukázky tabulky jednoho hydrologického roku.

Nicméně se nakonec všemi metodami dospělo ke stejnému výsledku. Do výpočtů ovšem nebyly zahrnuty ztráty výparem, které by výsledné hodnoty více či méně ovlivnily.



Obrázek 5.1: Srovnání výsledků různých metod výpočtu V_z

Tabulka 5.1: Srovnání výsledků výpočtu zásobního objemu

	α	MAX [$m^3.s^{-1}$]	V_z[m^3]
Starý	0.2	0.726	1910545
	0.4	4.4061	11587772
	0.6	13.912	36587455
	0.8	42.639	112139685
	1.0	94.922	249645256
McMahon & Adeloye	0.2	0.726	1910545
	0.4	4.4061	11587772
	0.6	13.912	36587455
	0.8	42.639	112139685
	1.0	94.922	249645256
Jain	0.2	0.726	1910545
	0.4	4.4061	11587772
	0.6	13.912	36587455
	0.8	42.639	112139685
	1.0	94.922	249645256
Patera	0.2	0.726	1910545
	0.4	4.4061	11587772
	0.6	13.912	36587455
	0.8	42.639	112139685
	1.0	94.922	249645256
Broža	0.2	0.726	1910545
	0.4	4.4061	11587772
	0.6	13.912	36587455
	0.8	42.639	112139685
	1.0	94.922	249645256

Kapitola 6

Závěr

V rámci rešerše byly sepsány různé metody výpočtů zásobního objemu nádrže z dostupných zahraničních i českých zdrojů. Souhrn informací je řazen chronologicky od počátku výpočtů velikosti zásobního objemu, které odstartoval Rippl roku 1883. Dále v zahraničí z tzv. rychlých metod navázali například Dincer, Gould, Vogel & Stedinger, Bayazit & Bulu, McMahon. z metod detailních Lele a Montaseri modifikovali SPA a Gould sestavil matici pravděpodobnosti přechodu. Krickij a Menkel se věnovali statistickým výpočtům velikosti zásobního objemu. v ČR jsou významnými osobnostmi v poli řešení nádrží především Klemeš, jehož postup výpočtu je značně komplikovaný (což ostatně zmiňoval i ve své knize Klemeš (2000), ve volném překladu "jak byl svět zachráněn před Klemešovou metodou"), dále pak Votruba a Broža. z jejich knihy (Votruba a Broža, 1980) vychází podstatná část následující literatury na toto téma. Nacházel, který sestrojil pomocné diagramy (viz str. 29) a Patera a Starý.

Simulační metody jsou pro výpočet podstatně jednodušší než metody statistické a optimalizační. Zvládnou s dosatečnou přesností určit velikost zásobního objemu nádrže. v podstatě jde "jen" o sčítání kroků výpočtu. Naopak statistické metody jsou komplikovanější, ale jsou schopné zahrnout větší množství proměnných parametrů.

Výpočet v bakalářské práci byl proveden pro koeficienty nalepšení $\alpha = 0{,}2$ až 1,0, tudíž pro nalepšený odtok O_p vycházející z koeficientu nalepšení a průměrného průtoku Q_a spočteného jako aritmetický průměr dané průtokové řady. Použity byly simulační modely sekvenčního špičkového algoritmu - SPA, dle McMahona & Adeloye (2005) a Jaina (2003), dle Brožy (1993) postupně bilanční metoda, dále dle Patery (2002) přímé řešení zásobního objemu nádrže a od Starého (2006) postup úlohy A.1. Rozdíl výsledků je nulový, jen přístup k řešení se liší. Tím se prokázalo, že metody jsou funkční.

Do práce nebyly zahrnuty výpočty ztrát vody z nádrže. Výsledky by se začaly lišit podle přístupu k výpočtu ztrát, uvažování hladiny v nádrži, výparu atd. Rovněž nebylo uvažováno s umělými průtokovými řadami, které jsou praktické pro zahrnutí výhod statistického přístupu k problematice a zároveň jednoduchosti výpočtu simulačními metodami. Výpočty neobsahovaly zástupce z řad statistických metod vzhledem ke komplikovanosti postupu, kdy je třeba odhadnout koeficienty variace a asymetrie, dále zvolit korelační funkci a sestrojit čáry zabezpečení sezónní a víceleté složky.

Kvůli času a rozsahu práce bylo z dostupných materiálů dle vlastního odhadu postiženo 30-40 % dané problematiky. Mnoho úvah a modifikovaných metod ze zahraničních i českých zdrojů nebylo v textu zahrnuto. Například Klemeš (2000) ve své knize shrnuje velké množství komentářů a připomínek k různým postupům výpočtů velikosti zásobního

objemu nádrží. Téma rozpracované v bakalářské práci je zcela otevřené. Vytvořilo podklad pro navazující práci a lze jej dále rozvíjet.

Literatura

BAYAZIT, M. and Bulu, A. Generalized probability distribution of reservoir capacity. J. Hydrol., 126: 195-205. 1991.

BROŽA, Vojtěch. Metodické návody k vodohospodářským řešením nádrží. Praha: ČVUT, 1981.

BROŽA, Vojtěch, Ivo KAZDA, Adolf PATERA a Eva PŘENOSILOVÁ. Vodohospodářské stavby. Vydání druhé přepracované. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993, 162 s.

JAIN, S.K., and Singh, V.P. Water Resources Systems Planning and Management: Determination of reservoir storage capacity. Elsevier, Amsterdam, 2003.

KLEMEŠ, Vít. Common sense and other heresies: selected papers on hydrology and water resources engineering. Cambridge, Ontario: Canadian Water Resources Association, 2000. ISBN 1-896513-18-2.

MCMAHON, T. A. a Adebayo J. ADELOYE. Water resources yield. Highlands Ranch, Colo.: Water Resources Publications, 2005. ISBN 1887201386.

MCMAHON, T. A. a Russel G. MEIN. Reservoir Capacity and Yield. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, 1978.

PATERA, Adolf. Nádrže a vodohospodářské soustavy 10. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02620-5.

RIPPL, W. The Capacity of Storage-Reservoirs for Water-Supply. In: Minutes of the Proceedings vol. 71 iss. 1883. Great Britain: Institution of Civil Engineers, 1883, s. 270-278.

STARÝ, Miloš. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Brno: Vysoké učení technické, 2006.

VOGEL, R.M. a J.R. Stedinger. Generalised storage-reliability-yield relationships. Jour. of Hydrology, 89, 303-327.

VOTRUBA, Ladislav a Vojtěch BROŽA. Hospodaření s vodou v nádržích. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1980.

Online zdroje

ECONOMIA. Ida protrhla střechu na US Open. Promočení diváci v panice prchali. *Aktualně.cz* [online]. 2. 9. 2021 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://zpravy.aktualne.cz/zahranici/metro-i-tenisovy-stadion-pod-vodou-new-yorkem-se-prehnaly-po/r bcd0f2fc0bc511ec8a900cc47ab5f122/

ECONOMIA. záplavy. *Aktualně.cz* [online]. (2019) [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://zpravy.aktualne.cz/zaplavy/l i:keyword:126/

MAFRA. Největší přírodní katastrofy v moderních dějinách Česka. *IDNES.cz* [online]. 25. 6. 2021 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/nejvetsi-prirodni-katastrofy-v-modernich-dejinach-ceska.A210625_ 143130_ domaci_ maka

KADEŘÁBKOVÁ, Milada. Nedostatkem vody trpí čtvrtina světa. Nejhůř je na tom 17 zemí. *Flowee.cz* [online]. 12. 8. 2019 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.flowee.cz/planeta/7027-nedostatkem-vody-trpi-ctvrtina-sveta-nejhur-je-na-tom-17-zemi

MIHULKA, Stanislav. Sucho na jihozápadě USA je podle vědců nejhorším za posledních 1 200 let. *EXTRA PUBLISHING, S. R. O. Stoplusjednicka.cz* [online]. 17.2.2022 [cit. 2022-05-23]. ISSN 1804-9907. Dostupné z: https://www.stoplusjednicka.cz/sucho-na-jihozapade-usa-je-podle-vedcu-nejhorsim-za-poslednich-1-200-let

ČESKÝ ROZHLAS. Evropa zažívá nejhorší sucho od dob Římské říše, na vině je hlavně změna klimatu, vyplývá ze studie. *Irozhlas.cz* [online]. 16. března 2021 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/priroda/evropa-sucho-zmena-klimatu-studie-rimska-rise_ 2103160636_ tzr

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Stav a vývoj sucha v Česku: Hodnotící zpráva k jednání Národní koalice pro boj se suchem [online]. květen 2020 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_ zpravy/2020/Stav_ a_ vyvoj_ sucha-kveten_ 2020.pdf

VD Vír. Povodí Moravy, s.p. [online]. Brno: *Ministerstvo zemědělství České republiky*, 2010, únor 2021 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/vir-i/

FOJTÍK, T., JAŠÍKOVÁ, L., KURFIŘTOVÁ, J., MAKOVCOVÁ, M., MAŤAŠOVSKÁ, V., MAYER, P., NOVÁKOVÁ, H., ZAVŘELOVÁ, J. a ZBOŘIL, A. *GIS a kartografie ve VÚV TGM.* Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2022, roč. 64, č. 1, str. 47–52. ISSN 0322-8916.

Centrální evidence vodních toků. *EAGRI* [online]. Ministerstvo zemědělství, 2009, 2014 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/mze/voda/aplikace/cevt.html

Reservoir capacity estimation. In: *Encyclopedia of Hydrology and Lakes.* Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht. (1998) https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6 $_1$89

Odchylka sucha od obvyklého stavu v období 1961 - 2010. In: *INTERSUCHO* [online]. 2012, 2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.intersucho.cz/cz/?from=2022-04-21to=2022-05-19t=2022-05-15

VISKOT, Marek. Úloha vodních nádrží v suchých letech: Konference Vodní nádrže 2019. Povodí Moravy: Dostupné z: http://www.pmo.cz/cz/hledani/?q=mimo%C5%99%C3%A1dn%C3%A1+manipulace, 2019.

Okolo Vírské přehrady. In: Vysočina [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.vysocina.eu/media/com_ xkatalog/images/listings/o/17104.jpg, nedatováno.