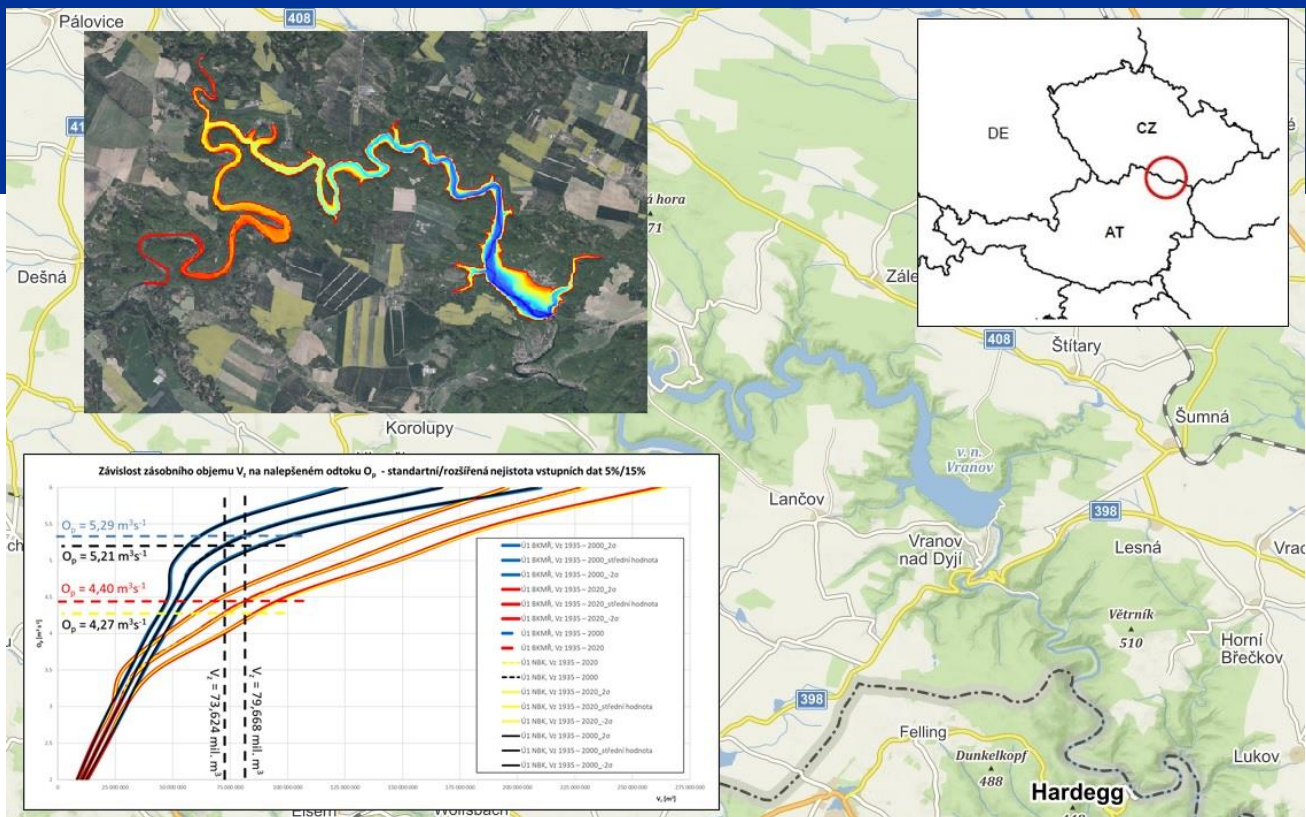


„A.T3.2.1 Vodohospodářské řešení nádrže v podmínkách nejistot“ Závěrečná zpráva k dílčímu výstupu

SEDECO (ATCZ 28)
Work package T3





Project coordination:

Helmut Habersack¹, Daniel Marton², Ludmila Kovářová³, Jürgen Gruber⁴

Author: Daniel Marton²

Picture front page: BUT

Brno, December 2022

The project was cofinanced by the „European Regional Development Fund“.





SEDECO (ATCZ 28)

Sedimente, Ökosystemdienstleistungen und Wechselwirkungen mit Hochwasser und Dürre in der AT-CZ Grenzregion

Sedimenty a ekosystémové služby ve vzájemném působení s povodněmi a suchem v pohraniční oblasti AT-CZ

Work package T3:

Hochwasser und Dürre / Povodně a sucho

Project final report

¹ University of Natural Resources and Life Science, Vienna
Department of Water, Atmosphere and Environment
Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering

² Vysoké učení technické v Brně
Faculty of Civil Engineering
Institute of Landscape Water Management

³ Povodí Moravy, s.p.

⁴ BOKU - Wasserbaulabor Errichtungs- und Betriebs-Gesellschaft m.b.H.

⁵ Federal Agency for Water Management, Vienna
Institute for Hydraulic Engineering and Calibration of Hydrometrical
Current-Meters



Abstrakt CZ

Údolní nádrže sloužící k vodárenským účelům jsou důležitým povrchovým zdrojem vody. Pro uvedené účely se využívá zásobní objem nádrží. Cílem závěrečné zprávy je souhrn provedené analýzy zásobního objemu nádrže Vranov, která je zpracovaná na základě aktualizovaných morfologických a hydrologických vstupních dat. Morfologická data jsou zastoupena aktualizovaným zaměřením dna nádrže Vranov z roku 2021 a následného vypracování nových batygrafických křivek nádrže. Zaměření dna nádrže a nové batygrafické křivky jsou dílčím výsledkem projektu INTERREG ATCZ28 - SEDECO a spolupráce mezi podnikem PP3 Povodí Moravy, s.p. a PP2 VUT FAST v Brně. Hydrologická data, která poskytl Český hydrometeorologický ústav, jsou aktualizována o měření do roku 2020 a zahrnují i extrémní suchou epizodu z let 2015 až 2018. Na podkladě aktualizovaných dat je pomocí simulace provozu nádrže vyhotovena analýza zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát vody výparem inovovanou iterativní metodou. Výsledky analýzy jsou vedle deterministického řešení provedeny i statisticky pro výpočet zásobního objemu s uvažováním nejistoty měření vstupních podkladů.

Abstract EN

Open water reservoirs used for water supply are one of the major fresh water resources. For these purposes the conservation storage volume is used. The aim of the final report is a summary of the reservoir yield analysis of the Vranov reservoir based on newest morphological and hydrological data. Morphological data are in the form of actual reservoir bathymetry measurement from 2021 and derivation of area-volume curves. Bathymetric measurement and area-volume curves are one of the outcomes of the INTERREG ATCZ28 - SEDECO project and cooperation between PP3 Povodí Moravy, s.p. and PP2 BUT FCE. The hydrologic data provided Czech Hydrometeorological Institute. Data are till 2020 and consist of extreme drought event between 2015 and 2018. Based on newest data as well as reservoir storage simulation the yield analysis of reservoir storage volume considering novel water evaporation loss iteration method. Next to deterministic results the statistical uncertainty analysis of the reservoir yield storage are made based on inputs data uncertainty.

Abstract DE

Talsperren, die für Wasserversorgungszwecke genutzt werden, sind eine wichtige Oberflächenwasserressource. Für die genannten Zwecke wird das Betriebsraumvolumen der Stauseen genutzt. Das Ziel des Abschlussberichts ist eine Zusammenfassung der Analyse des Stauraumvolumens im Stausee Vranov auf der Basis aktualisierter morphologischer und hydrologischer Eingangsdaten. Die morphologischen Daten liegen in Form der aktualisierten Sohlenvermessung im Stausee Vranov aus dem Jahr 2021 und der anschließenden Ableitung neuer bathygraphischer Kurven vor. Die Sohlenvermessung und die neuen bathygraphischen Kurven sind eines der Detailoutputs des Projektes INTERREG ATCZ28 – SEDECO und der Zusammenarbeit zwischen dem PP3 Povodí Moravy, s.p. und dem PP2 BUT FCE in Brünn. Die vom Tschechischen Hydrometeorologischen Institut bereitgestellten hydrologischen Daten sind mit Messungen bis 2020 aktualisiert und beinhalten auch die extreme Trockenperiode 2015–2018. Basierend auf den aktualisierten Daten erfolgt eine Analyse des Betriebsraumvolumens des Stausees mittels einer Betriebssimulation unter Verwendung eines innovativen Iterativverfahrens zur Berücksichtigung der Verdunstungsverluste. Neben den deterministischen Ergebnissen wird auch die statistische Unsicherheitsanalyse zur Berechnung des Betriebsraumvolumens aufgrund der Unsicherheiten in den Inputdaten durchgeführt.

Obsah

Abstrakt CZ	1
1 Úvod a cíl	4
2 Metodologie	5
3 Popis zájmové lokality a vstupní data	5
4 Praktická aplikace	8
5 Shrnutí výsledků	12
6 Závěr	14
Literatura	17

1 Úvod a cíl

Poslední roky ukazují, že klimatická změna je stále významnější problém ovlivňující životní prostředí a lidskou společnost. IPCC ve své 6. hodnotící zprávě uvádí, že „je prakticky jisté, že vlivem lidské činnosti dochází k oteplení atmosféry, oceánu i pevniny. Dochází k rozsáhlým a rychlým změnám v atmosféře, oceánu, kryosféře a biosféře“ [1]. Je jasné, že postupná změna klimatu má také přímý vliv na hydrologické podmínky v povodích a s ním související hospodaření s povrchovými a podzemními vodními zdroji. Také strategické dokumenty Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR [2] a Národní akční plán adaptace na změnu klimatu [3] schválené vládou ČR v roce 2015 a aktualizované v roce 2017 a 2021 řadí problematiku efektivního hospodaření s vodními zdroji k možným adaptačním opatřením. Přímo v [2] je problematika posouzení funkčních objemů stávajících nádrží vytyčena jako jedno z adaptačních opatření v hospodaření s povrchovými zdroji v boji proti změně klimatu. Proto přesná informace o dostupném objemu vody v nádrži společně s aktualizací meteorologických, morfologických, hydrologických dat a vývojem nových metod analýzy zásobního objemu jsou v kontextu zmíněného nanejvýše aktuální.

Cílem závěrečné zprávy je zpracování dílčího výstupu A.T3.2.1 Vodohospodářské řešení nádrže v podmínkách nejistot v plánovaného jako výstup pracovního balíčku T3 Povodně a sucho. Ve zprávě jsou popsány výsledky analýzy zásobního objemu nádrže Vranov. Analýza byla zpracovaná na podkladě dat dle manipulačního řádu z roku 2011 [4] a aktualizovaných morfologických a hydrologických vstupních dat do současnosti. Morfologická data jsou zastoupena nejnovějším zaměřením dna nádrže Vranov z roku 2021 a vypracovaných nových batygrafických křivek nádrže, které jsou součástí dílčího výstupu pracovního balíčku T1 Transport a management sedimentů, Aktivity A.T1.2 Monitoring dynamiky dna nádrží. Hydrologická data jsou aktualizována o poslední volně dostupná měření do roku 2020 a zahrnují i extrémní suchou epizodu z let 2015 až 2018. Na základě aktualizovaných dat je pomocí simulace provozu nádrže provedena analýza zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát vody výparem inovovanou iterativní metodou. Výsledky analýzy jsou zpracovány ve formě deterministického řešení a statisticky, tedy s uvažováním nejistoty měření vstupních podkladů a následné nejistoty výstupních hodnot zásobních objemů a zabezpečení odtoku vody z nádrže.

Závěrečná zpráva rozšiřuje výsledky, které byly v rámci publikace [5] prezentovány před širokou odbornou veřejností na konferenci Vodní nádrže 2022. Detailní výpočty a analýza jsou také zpracovány v rámci diplomové práce [6].

2 Metodologie

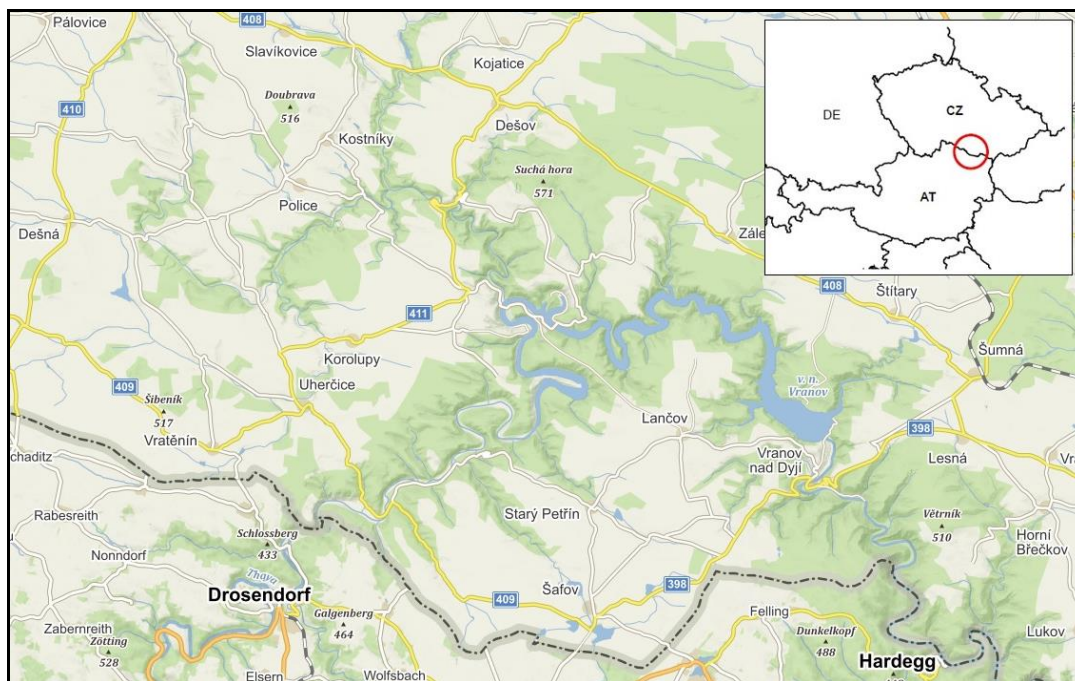
Odvození batygrafických křivek bylo provedeno pomocí softwaru ArcGIS ArcMap, který je schopen vytvořit digitální model terénu (DMT) formou georeferencovaného rastru. Postup odvození byl následující: nejprve nastavení výchozího souřadnicového systému JTSK Krovak EastNorth, potom načtení bodů do databázového souboru dBase pomocí ArcToolbox Conversion tools/To dBase, a následné sloučení do jednoho souboru pomocí Data Management Tools/General/Merge. Následuje vytvoření vrstvy rastru terénu a dna nádrže z naměřených bodů pomocí funkce Conversion Tools/To Raster/Point to Raster a sestavení digitálního výškového modelu (DEM) a modelu vrstevnic pomocí funkce Spatial Analyst Tools/Interpolation/Topo to Raster a funkce Surface/Contour. V poslední řadě se pak dopočítají objemy vody pro příslušné hodnoty vrstevnic. Detailní postup zpracování je k dispozici v průběžných zprávách: i) Report za monitorovací období MO7 „Modelování dna a výpočet objemu nádrže pomocí ArcGIS softwaru“ a ii) Report za monitorovací období 10 a 11 „Tvorba digitálního modelu terénu dna nádrže Vranov na základě zaměření a následná analýza batygrafických čar“.

Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže bylo provedeno pomocí programu UNCERESERVOIR [7]. Software řeší základní dvě úlohy simulace provozu nádrže a to výpočet zásobního objemu V_z při zabezpečení dle trvání $P_t = 100\%$ (úloha 1) a stanovení nejlepšího odtoku vody z nádrže O_p pro daný V_z a $P_t < 100\%$ (úloha 2). Obě úlohy je software schopen počítat jak v deterministickém tak statistickém, resp. stochastickém řešení, tedy s uvažováním nejistot vstupních veličin. Základem programu je simulační model chování nádrže, který popsal Starý v [8]. Algoritmus softwaru vychází z upravené základní rovnice nádrže v součtovém tvaru, která je omezena podmínkou typu nerovnosti. Výpočet zabezpečení je proveden podle klasického vztahu dle Čegodajeva viz [8] a norma ČSN 75 2405 [9], kdy je stanovena zabezpečení podle trvání P_t a množství nedodané vody P_d . Simulační model nádrže do výpočtů zahrnuje i ztráty vody z nádrže. Ztráty jsou uvedeny ve formě ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Ztráty jsou řešeny iterační metodou. Nejistoty vstupních veličin jsou do výpočtů zavedeny pomocí metody Monte Carlo detailně popsané v [10] a [11].

3 Popis zájmové lokality a vstupní data

Vodní nádrž Vranov se nachází v Jihomoravském kraji mezi Podhradím nad Dyjí a Vranovem nad Dyjí na 175,41 km řeky Dyje, viz obrázek 1. Hlavní účely provozu nádrže jsou zásobování vodou, hydroenergetický, rekreační, rybaření, plavba a protipovodňová ochrana. Provozovatelem nádrže je státní podnik Povodí Moravy. Nádrž má celkový objem 132,6 milionů m^3 vody. Z toho prostor stálého nadržení V_s je 31,840 milionů m^3 , zásobní objem V_z je 79,668 milionů m^3 , retenční objem ovladatelný V_{ro} je 11,157 mil. m^3 a neovladatelný V_{rn} je 10,031 mil. m^3 . Těleso hráze je betonové gravitační a výška hráze je 59,9 m s délkou v koruně

290,5 m. Nádrž byla uvedena do provozu v roce 1934. Povodí nad nádrží má rozlohu 2 211,80 km² a hlavní přítoky vody do nádrže jsou řeka Dyje a Želetavka. Průměrný dlouhodobý průtok Q_a je 9,740 m³ s⁻¹. Roční hodnota výparu z vodní hladiny E_a při zatopené ploše 55 880 ha k nadmořské výšce 348,45 m n.m. činí 650 mm/rok [4].



Obr. 1 – Nádrž Vranov.

Použitá morfologická data ve formě batygrafických křivek byla převzata jednak z manipulačního řádu k vodnímu dílu [4], ale také byla využita data z nového zaměření dna nádrže provedeného PP3 podnikem Povodí Moravy, s.p. v roce 2021 a jím navazujících doměření provedeného PP2 VUT FAST v Brně.

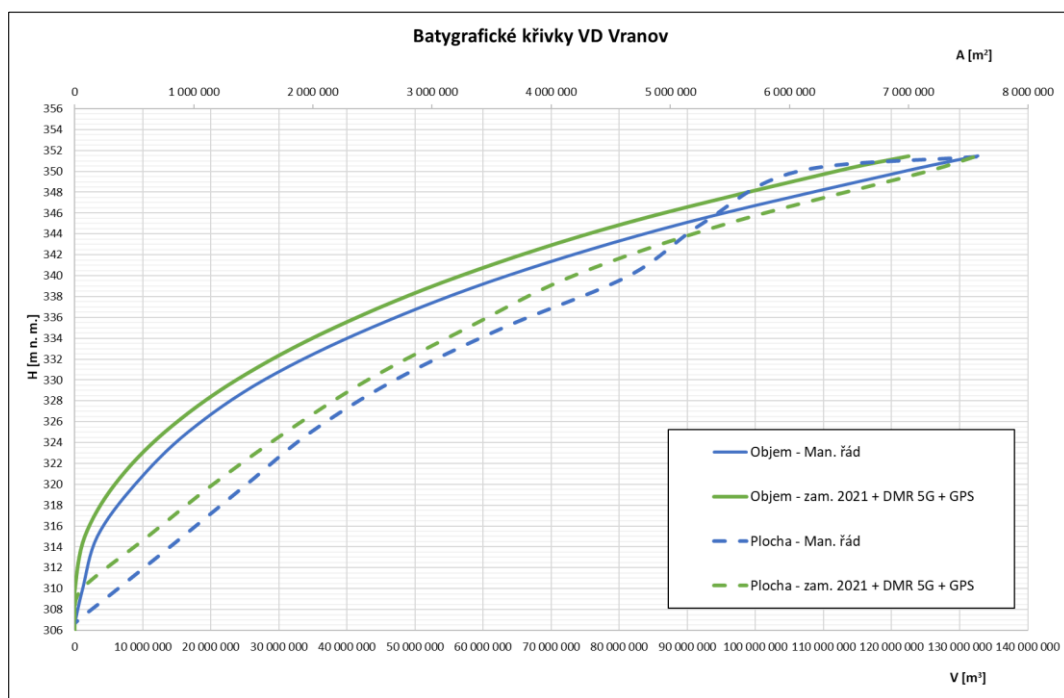
Celkově zaměření dna nádrže bylo složeno ze tří datových balíčků. První obsahoval soubory dat měření dna pomocí Echo lodě v surové podobě ve formě textových souborů ze tří měřících kampaní. Data obsahovala souřadnice XY v souřadnicovém systému GPS a UTM WGS84 32N a k jednotlivým zaměřeným bodům odpovídající hloubku vody. Z-tová souřadnice zaměřeného bodu dna byla získána odečtením hloubky vody ze zaměření bodu od polohy hladiny pro konkrétní měření. Druhý balík dat tvořil podkladová data výškopisu digitálního modelu reliéfu páté generace ZABAGED – DMR 5G přilehlého okolí nádrže. Třetí balík obsahoval doplňková data z ručního měření nezaměřených břehových linií nádrže pomocí GPS měřící stanice. Detailní postupy obsahující práci s daty, doměření, metodiku zpracování a samotné zpracování dat byly popsány v průběžných zprávách Report za monitorovací období 10 a 11 „Tvorba digitálního modelu terénu dna nádrže Vranov na základě zaměření a následná analýza batygrafických čar“. Výsledky ve formě tabelárních hodnot batygrafických křivek pro manipulační řád, zaměření lodí 2021 v kombinaci s DMR, zpřesněné zaměření 2021 + DMR +

GPS a rozdílu hodnot mezi manipulačním řádem a zaměřením 2021 + DMR + GPS jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Hodnoty batygrafických křivek pro manipulační řád, zaměření 2021, zpřesněná zaměření 2021 + DMR 5G a 2021 + DMR 5G + GPS.

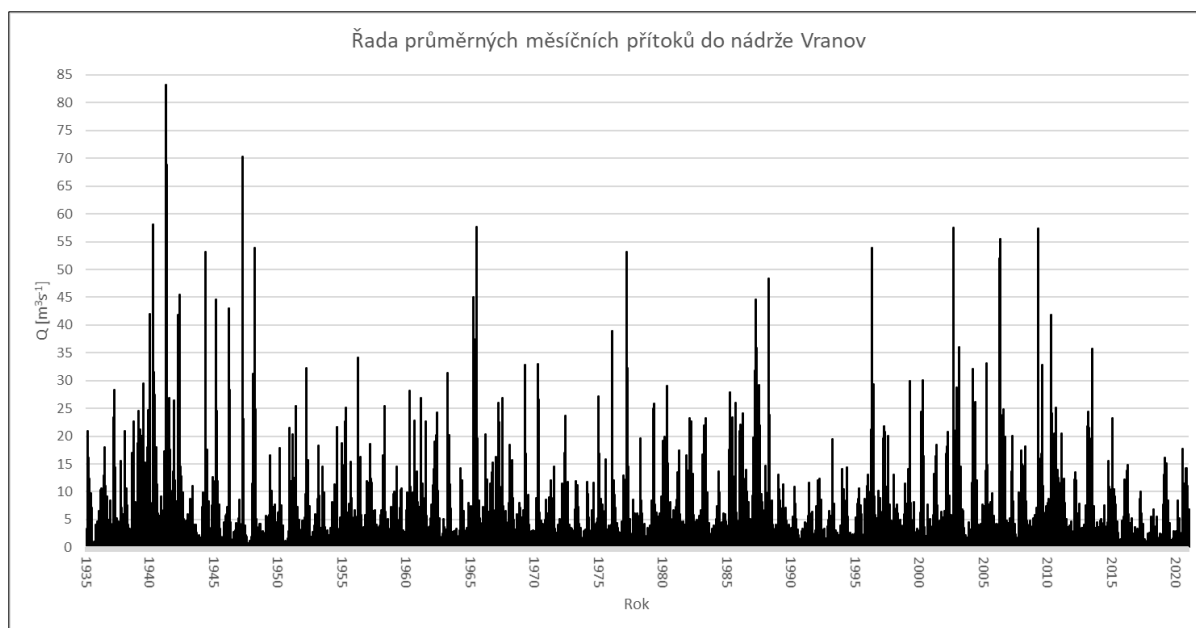
manipulační řád			zaměření + DMR 5G			zaměření + DMR 5G + GPS			Rozdíl		
kóta	Objem [m ³]	Plocha [m ²]	kóta	Objem [m ³]	Plocha [m ²]	kóta	Objem [m ³]	Plocha [m ²]	kóta	Objem [m ³]	Plocha [m ²]
306	0	0	306	0	0	306	0	0	306	0	0
306.66	3 462	1 090	307.5	17	399	307.5	17	394	307.5	0	-5
310	1 159 615	365 064	310	43 421	62 298	310	43 392	62 245	310	-29	-52
315	3 312 857	908 929	315	1 478 314	613 968	315	1 478 391	614 063	315	77	95
320	8 884 286	1 444 643	320	5 888 849	1 160 931	320	5 889 186	1 161 027	320	338	96
325	16 655 441	1 982 907	325	13 203 621	1 771 832	325	13 204 144	1 771 864	325	523	33
330	27 843 402	2 688 290	330	23 722 249	2 457 436	330	23 723 054	2 457 622	330	805	185
335	43 581 626	3 595 651	335	38 070 683	3 294 418	335	38 072 628	3 294 651	335	1 946	232
340	63 664 477	4 652 626	340	56 677 296	4 184 221	340	56 681 979	4 185 530	340	4 684	1 309
345	89 442 582	5 268 372	345	80 640 620	5 437 289	345	80 687 143	5 475 842	345	46 523	38 553
350	121 988 818	6 068 485	350	111 543 149	7 150 666	350	111 716 520	7 153 938	350	173 371	3 271
351.46	132 696 000	7 625 000	351.46	122 290 477	7 563 033	351.46	122 468 778	7 566 308	351.46	178 301	3 275
			353.40	137 441 163	8 056 239	353.40	137 627 303	8 061 139	353.40	186 140	4 900

Na obrázku 2 jsou pak zpracovány graficky batygrafické křivky nádrže Vranov. Modrá a zelená plná čára znamenají čáru zatopených objemů pro manipulační řád a zaměření 2021. Modrá a zelená čárkovaná čára znamenají čáru zatopených ploch pro manipulační řád a zaměření 2021.



Obr. 2 - Batygrafické křivky nádrže Vranov.

Použitá hydrologická data obsahovala informace o průměrných měsíčních průtocích Q_m profilů Dyje/Travní Dvůr a Želetavka/Vysočany se záznamem měření od roku 1935 až do roku 2020. Zahrnují tedy i extrémní suchou epizodu z let 2015 až 2018. Data jsou k dispozici pro nekomerční účely zdarma ke stažení na webových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu (www.chmi.cz). Chronologický průběh řady průměrných měsíčních přítoků do nádrže Vranov je znázorněn na obrázku 3.



Obr. 3 - Chronologický průběh řady průměrných měsíčních přítoků do nádrže Vranov za období 1935 až 2020.

4 Praktická aplikace

Prvním krokem praktické aplikace bylo vyčíslení rozdílů ve formě relativní změny objemů batygrafických křivek pro manipulační řád a zpřesněné zaměření 2021 + DMR 5G + GPS, viz tabulka 2.

Tabulka 2. Hodnoty batygrafických křivek a relativní změna objemu pro manipulační řád a zpřesněné zaměření 2021 + DMR 5G + GPS.

kóta [m n.m.]	Manipulační řád		Zaměření 2021 + DMR 5G + GPS		Relativní změna objemů [%]
	objem [m ³]	plocha [m ²]	objem [m ³]	plocha [m ²]	
306	0	0	0	0	-
310	1 159 615	365 064	43 392	62 245	-96,3
315	3 312 857	908 929	1 478 391	614 063	-55,4
320	8 884 286	1 444 643	5 889 186	1 161 027	-33,7
325	16 655 441	1 982 907	13 204 144	1 771 864	-20,7
330	27 843 402	2 688 290	23 723 054	2 457 622	-14,8
335	43 581 626	3 595 651	38 072 628	3 294 651	-12,6
340	63 664 477	4 652 626	56 681 979	4 185 530	-11,0
345	89 442 582	5 268 372	80 687 143	5 475 842	-9,8
350	121 988 818	6 068 485	111 716 520	7 153 938	-8,4
351,46	132 696 000	7 625 000	122 468 778	7 566 308	-7,7

Pomocí uvedených dat byly následně odečteny změněné hodnoty funkčních objemů nádrže V_{2021} ze zaměření 2021 + DMR 5G + GPS a dopočítány relativní změny dílčích funkčních objemů oproti funkčním objemům z manipulačního řádu $V_{MŘ}$, viz tabulka 3.

Tabulka 3. Hodnoty funkčních objemů nádrže Vranov pro manipulační řád a zpřesněné zaměření 2021 + DMR 5G + GPS.

	H [m n. m.]	$V_{MŘ}$ [m ³]	V_{2021} [m ³]	Relativní změna V [%]
V_s	331.45	31 840 000	27 443 026	-13.81
V_z	348.45	79 668 000	73 623 860	-7.59
V_{ro}	350.10	11 157 000	11 366 610	1.88
V_{rn}	351.46	10 031 000	10 035 282	0.04
V_{TOTAL}		132 696 000	122 468 778	-7.71

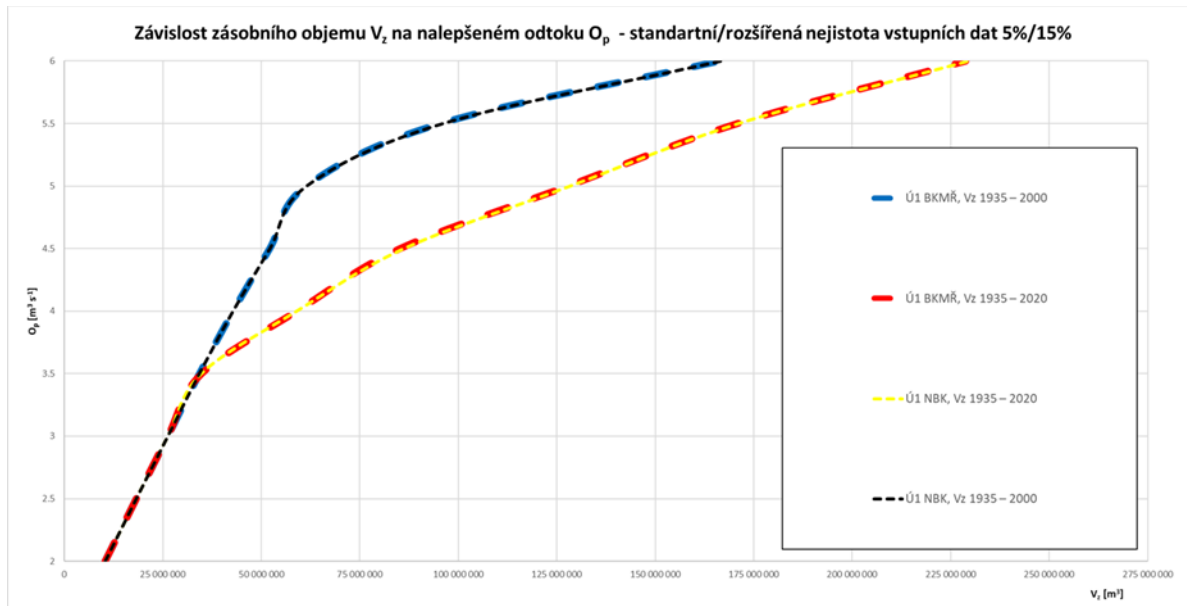
Analýza vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže byla řešena pro dvě základní úlohy 1 a 2. Nalepšený odtok vody z nádrže O_p byl konstantní pro všechny měsíce v roce. Variační rozpětí zásobního objemu v úloze 2 tvořily hodnoty plného zásobního objemu $V_{z,max}$ 79 668 000 m³ a objemu po vyprázdnění z manipulačního řádu a $V_{z,max}$ 73 623 860 m³ a objemu po vyprázdnění ze zaměření 2021 + DMR 5G + GPS.

Do výpočtu byly nejprve vloženy původní batygrafické křivky z manipulačního řádu a řada průměrných měsíčních průtoků za období let 1935 až 2000 a za období 1935 – 2020. Zásobní objem byl posuzován pro $V_{z,max}$ 79 668 000 m³ a $V_{z,max}$ 73 624 000 m³. Výsledky jsou pojmenovány jako: i) Ú1 BKMŘ, V_z 1935 – 2000, ii) Ú1 BKMŘ, V_z 1935 – 2020, iii) Ú2 BKMŘ, P_t 1935 – 2000, iv) Ú2 BKMŘ, P_t 1935 – 2020. Dále byly řešeny stejné úlohy, ale za použití nových batygrafických křivek odvozených z měření 2021 a pojmenovány jako: i) Ú1 NBK, V_z 1935 – 2000, ii) Ú1 NBK, V_z 1935 – 2020, iii) Ú2 NBK, P_t 1935 – 2000, iv) Ú2 NBK, P_t 1935 – 2020. Vše řešeno deterministicky s uvažováním ztrát vody výparem o hodnotě $E_a = 650$ mm/rok.

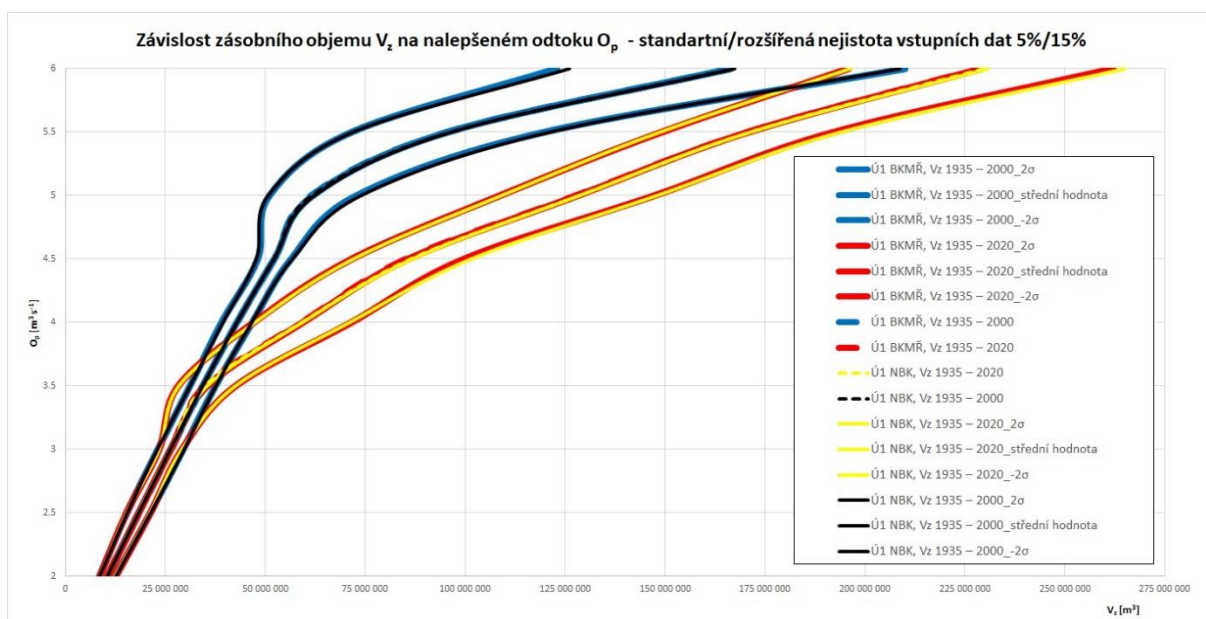
Následně byl proveden stejný výpočet úlohy 1 a 2 s uvažováním nejistot vstupních dat, kdy nejistota byla do výpočtu zavedena pro vstupní parametry přítoku vody do nádrže, batygrafické křivky a výparu jednotně jako standardní nejistota 5%, resp. rozšířená 15%. Počet opakování generace náhodných vstupních parametrů metodou Monte Carlo byl $PO = 300$. Výsledky jsou prezentovány ve formě statistických charakteristik střední hodnoty $\mu(V_z)$, $\mu(P_t)$ a dvojnásobku směrodatné odchylky $\pm 2\sigma(V_z)$, $\pm 2\sigma(P_t)$ pokrývající 95% pravděpodobnosti výskytu náhodné veličiny.

Pro zjednodušení prezentace analýzy jsou výsledky zpracovány do přehledných grafických závislostí, tzv. vztahových křivek. V úloze 1 křivky popisují závislost mezi zásobním objemem V_z a nalepšeným odtokem O_p . V úloze 2 pak křivky popisují závislost mezi zabezpečeností podle trvání odtoku vody z nádrže P_t a nalepšeným odtokem O_p .

Obrázky 4 a 5 zobrazují výsledky výpočtu úlohy 1 v podobě závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku vody z nádrže O_p pro deterministické a statistické řešení.

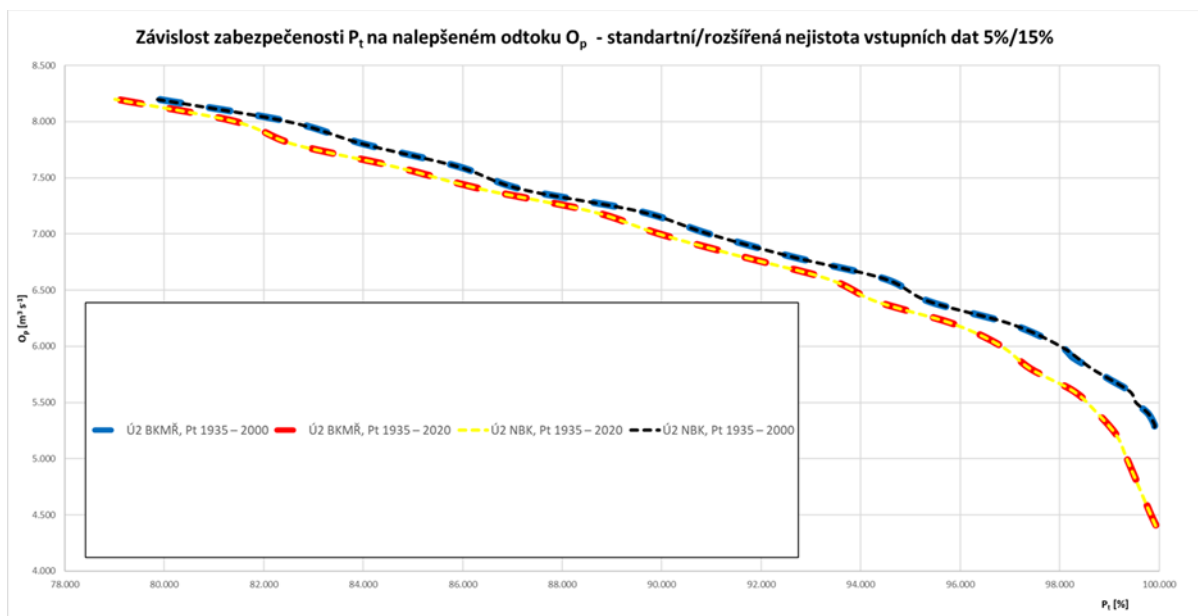


Obr. 4 – Závislost zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku vody z nádrže O_p – deterministické řešení.

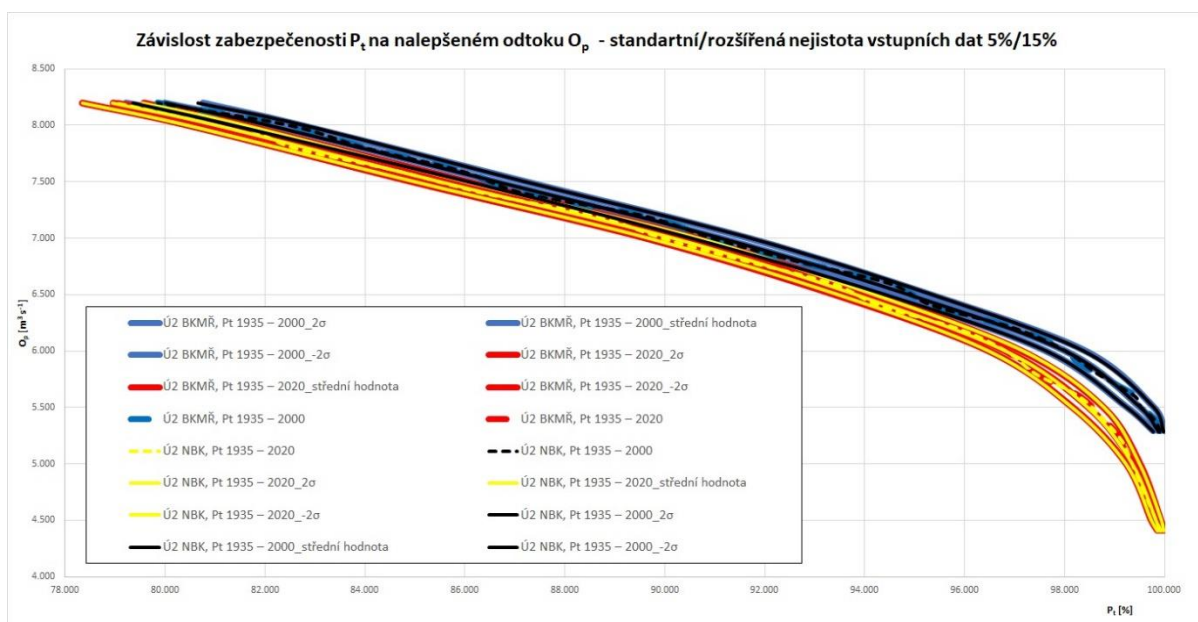


Obr. 5 – Závislost zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku vody z nádrže O_p – statistické řešení.

Obrázky 6 a 7 zobrazují výsledky výpočtu úlohy 2 v podobě závislosti zabezpečení podle trvání odtoku vody z nádrže P_t a nalepšeným odtokem O_p pro deterministické a statistické řešení a mezní hodnotu zásobního objemu $V_{z,max}$ 79 668 000 m³.

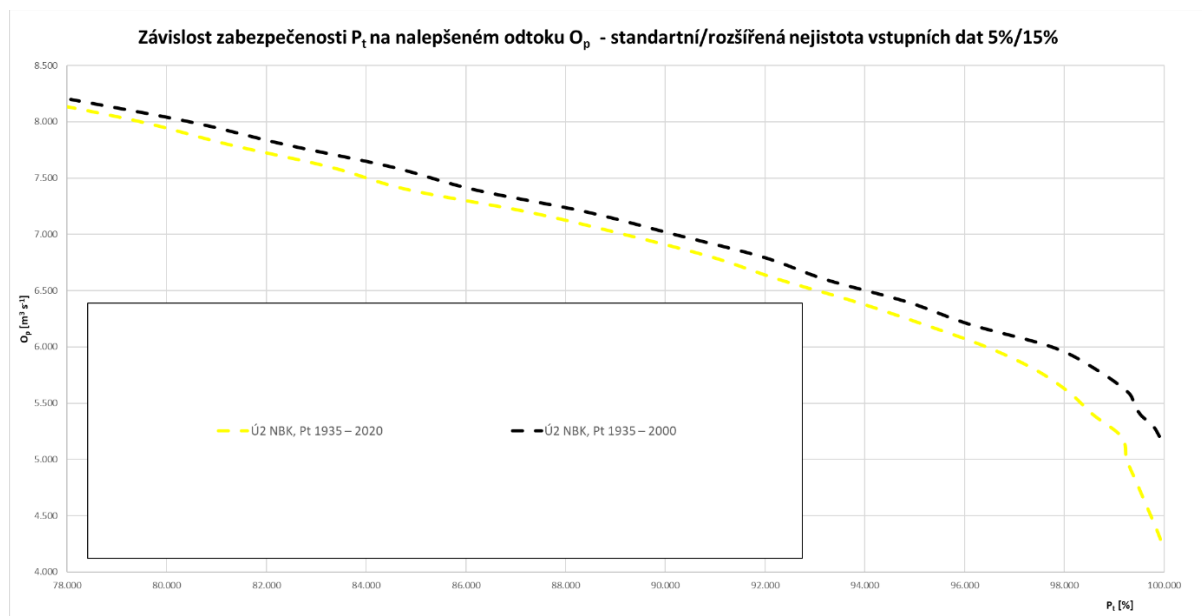


Obr. 6 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 79,668$ mil. m^3 – deterministické řešení.

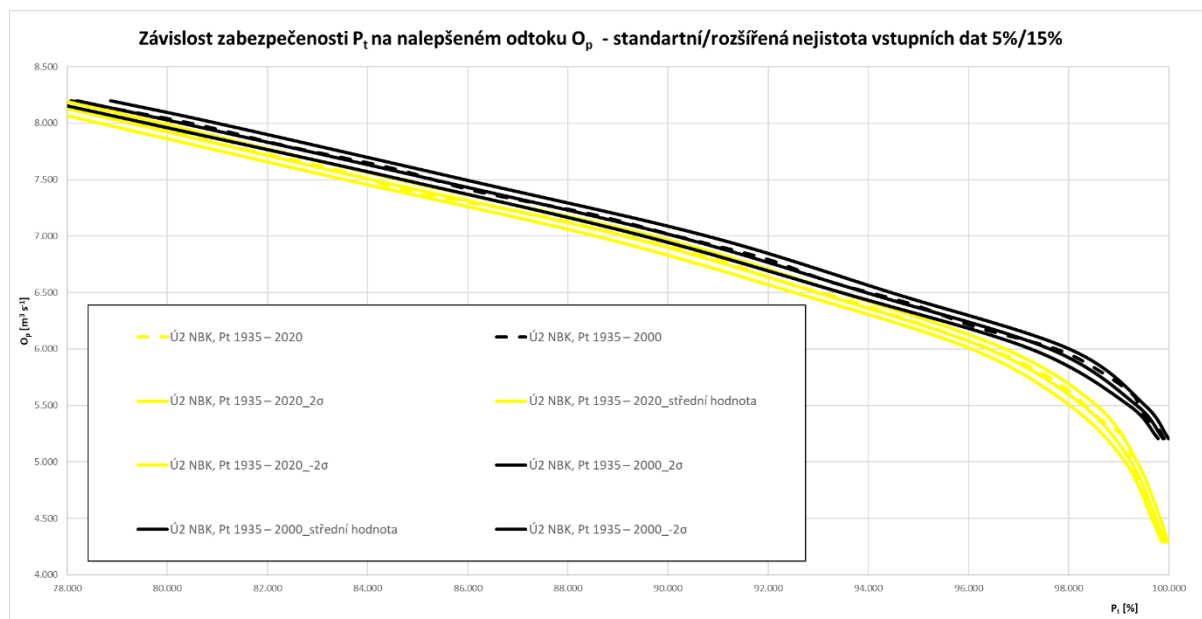


Obr. 7 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 79,668$ mil. m^3 – statistické řešení.

Obrázky 8 a 9 zobrazují výsledky výpočtu úlohy 2 v podobě závislosti zabezpečení podle trvání odtoku vody z nádrže P_t a nalepšeným odtokem O_p pro deterministické a statistické řešení a mezí hodnotu zásobního objemu $V_{z,max}$ 73 624 000 m^3 . Kdy uvedené výsledky byly zpracovány pouze pro varianty výpočtu Ú2 NBK, P_t 1935 – 2000 a Ú2 NBK, P_t 1935 – 2020, protože výpočty variant s uvažování starých batygrafických křivek dle manipulačního řádu jsou v podstatě totožné s uvedenými na obrázcích.



Obr. 8 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 73,624$ mil. m^3 – deterministické řešení.

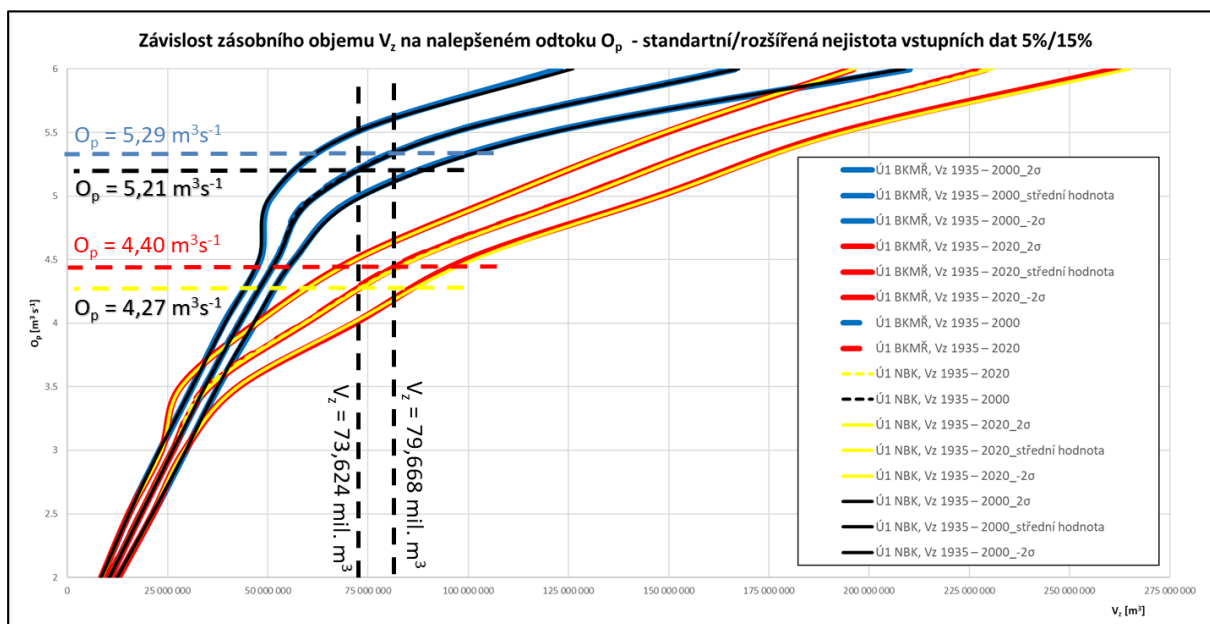


Obr. 9 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 73,624$ mil. m^3 – statistické řešení.

5 Shrnutí výsledků

Na obrázku 10 jsou prezentovány kompletní výsledky analýzy vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro úlohu 1 v podobě grafu závislosti zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku vody z nádrže O_p . Pro deterministické řešení a varianty staré a nové batygrafické křivky platí pro období 1935 až 2000 modrá a červená čárkovaná čára a období 1935 až 2020 černá a žlutá čárkovaná čára. Pro uvažování kombinovaných nejistot přítoku vody do nádrže, batygrafických křivek a výparu vody z nádrže pro hodnotu standartní nejistoty 5% jsou výsledky vykresleny plnou čarou. Každá z pomyslných trojic čar znamená: i) prostřední

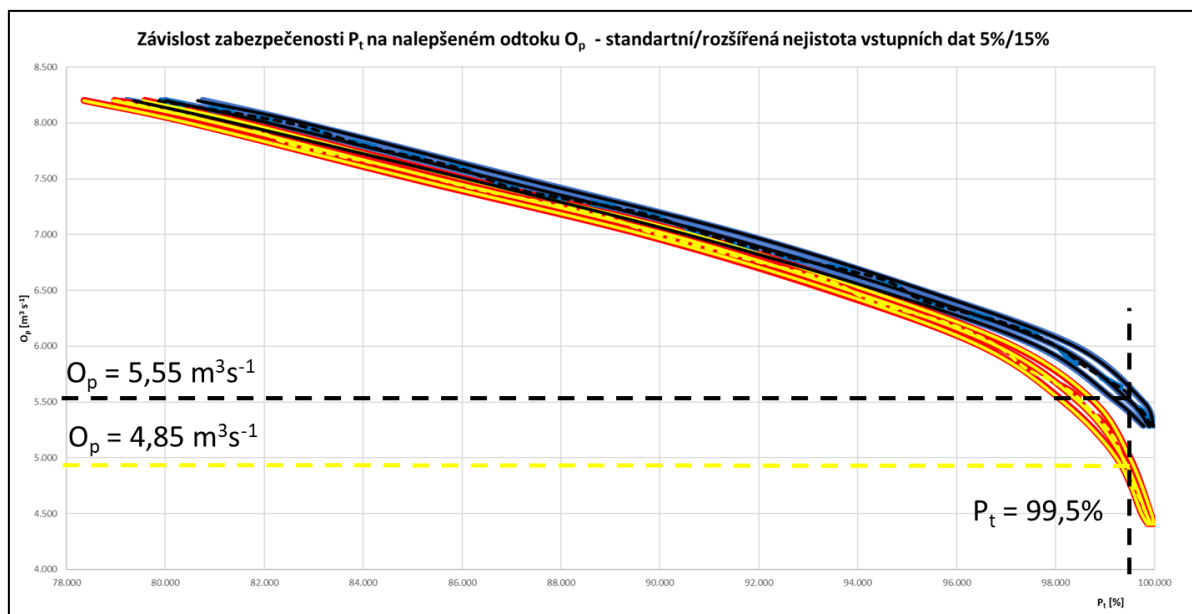
plná modrá a černá čára jsou střední hodnoty zásobního objemu $\mu(V_z)$ a obalové modré a černé křivky nejistoty ve formě směrodatné odchylky $\pm 2\sigma(V_z)$ pro období 1935 až 2000, ii) prostřední plná žlutá a červená jsou $\mu(V_z)$ a obalové křivky nejistoty ve formě $\pm 2\sigma(V_z)$ pro období 1935 až 2020. Naznačeny jsou i výsledky přesných hodnot nalepšeného odtoku O_p stanovené pro zásobní objem $V_z = 79\,668\,000\text{ m}^3$ a $V_z = 73\,624\,000\text{ m}^3$.



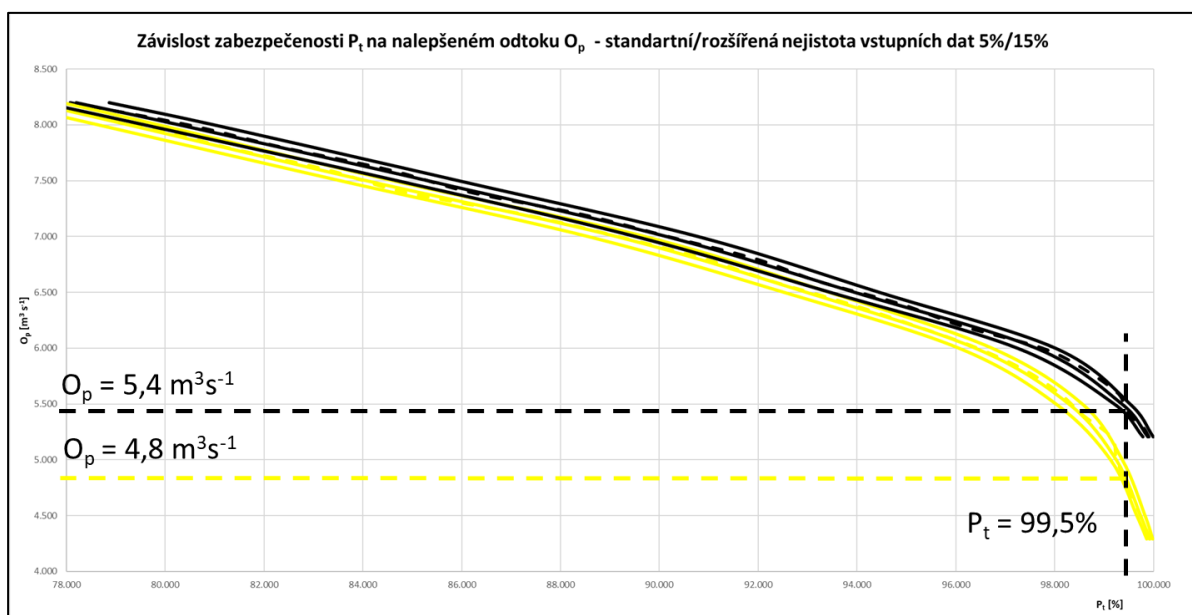
Obr. 10 – Závislost zásobního objemu V_z na nalepšeném odtoku vody z nádrže O_p .

Na obrázku 11 jsou pak prezentovány výsledky úlohy 2 ve formě závislosti zabezpečení dle trvání odtoku vody z nádrže P_t a nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p pro mezní hodnotu zásobního objemu $V_{z,max}$ $79\,668\,000\text{ m}^3$. Popis čar je totožný jako na obrázku 10 pouze aplikovaný pro úlohu 2. Naznačeny jsou i výsledky přesných hodnot nalepšeného odtoku O_p stanovené pro kategorii významnosti zabezpečení nádrží třídy A ($P_t \leq 95\%$) dle normy ČSN 75 2405 [9]. Černá čárkovaná vodorovná čára odpovídá hodnotě O_p pro variantu úlohy Ú2 BKMŘ P_t 1935-2000 a Ú2 NBK P_t 1935-2000. Žlutá čárkovaná vodorovná čára odpovídá hodnotě O_p pro variantu úlohy Ú2 BKMŘ P_t 1935-2020 a Ú2 NBK P_t 1935-2020.

Na obrázku 12 jsou prezentovány stejné výsledky závislostí P_t na O_p pro mezní hodnotu zásobního objemu $V_{z,max}$ $73\,624\,000\text{ m}^3$. Popis čar je totožný jako na obrázcích 10 a 11. Naznačeny jsou i výsledky přesných hodnot nalepšeného odtoku O_p stanovené pro kategorii významnosti zabezpečení nádrží třídy A ($P_t \leq 95\%$) dle normy ČSN 75 2405 [9]. Černá čárkovaná vodorovná čára odpovídá hodnotě O_p pro variantu úlohy Ú2 NBK P_t 1935-2000. Žlutá čárkovaná vodorovná čára odpovídá hodnotě O_p pro variantu úlohy Ú2 NBK P_t 1935-2020.



Obr. 11 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 79,668 \text{ mil. m}^3$.



Obr. 12 – Závislost zabezpečení P_t na nalepšeném odtoku vody O_p pro $V_z = 73,624 \text{ mil. m}^3$.

6 Závěr

Prezentované výsledky se dají formulovat do následujících závěrů:

- Změna celkového objemu nádrže na kótě hladiny 351,46 m n. m. činí 10,227 mil m^3 , což je relativní změna celkového objemu 7,71%. Změna objemu stálého nadržení na hladině 331,45 m n. m. je z 31,840 mil m^3 na 27,443 mil m^3 , což jsou 4,4 mil. m^3 resp. 13,81% a velikost zásobního objemu na hladině 348,45 m n. m. z 79,668 mil. m^3 se snížila o 6 mil. m^3 což odpovídá 73,624 mil. m^3 a relativní změně 7,59%.

- Vliv nových batygrafických křivek na zásobní objem a odtok vody není tak významný jako vliv hydrologické řady. Vše lze demonstrovat v úloze 1 v deterministickém řešení pro hodnotu $V_z = 79,668$ milionů m^3 , období 1935 až 2000 a staré batygrafické křivky je $O_p = 5,290 m^3s^{-1}$ a pro nové křivky a odečtený objem $V_z = 73,624$ mil m^3 je $O_p = 5,207 m^3s^{-1}$. Pro období 1935 až 2020 a staré batygrafické křivky je hodnota odtoku $O_p = 4,40 m^3s^{-1}$ a pro nové křivky a zásobní objem je $O_p = 4,29 m^3s^{-1}$. Procentuálně vyjádřeno je relativní vliv změny batygrafie na objem -7,59%. Relativní změna nalepšených odtoků je -1,57% a -2,5% a relativní změna nalepšených průtoků mezi obdobími 1935 - 2000 a 1935 – 2020 je -16,82% a -17,61%.
- Výsledky úlohy 2 v deterministickém řešení pro mezní hodnotu $V_{z,max} = 79,668$ milionů m^3 , období 1935 až 2000 a staré batygrafické křivky je $O_p = 5,53 m^3s^{-1}$ a $P_t = 99,533 \%$. Pro nové křivky je $O_p = 5,510 m^3s^{-1}$ a $P_t = 99,533 \%$. V období 1935 až 2020 je $O_p = 4,8 m^3s^{-1}$ pro $P_t = 99,545\%$.
- Výsledky úlohy 2 v deterministickém řešení pro mezní objem $V_{z,max} = 73,624$ mil m^3 , období 1935 až 2000 a staré i nové batygrafické křivky je $O_p = 5,410 m^3s^{-1}$ pro $P_t = 99,533\%$. V období 1935 až 2020 a staré batygrafické křivky je hodnota odtoku $O_p = 4,77 m^3s^{-1}$ pro hodnotu $P_t = 99,545\%$, pro nové křivky je $O_p = 4,75 m^3s^{-1}$ pro $P_t = 99,545\%$.
- Výsledky výpočtu úlohy 1 s uvažováním nejistot byly následující. Nejbližší výsledky $\mu(V_z)$ k hodnotě 79,668 mil. m^3 pro délku řady 1935 až 2000 a staré batygrafické křivky byly $O_p = 5,290 m^3s^{-1}$, $\mu(V_z) = 79,608$ mil m^3 , hodnota $\pm 2\sigma(V_z) = 6,845$ mil m^3 . Což odpovídá relativní nejistotě $\mu(V_z) \pm 8,6\%$. Pro nové křivky je $O_p = 5,207 m^3s^{-1}$, $\mu(V_z) = 73,631$ mil. m^3 , hodnota $\pm 2\sigma(V_z) = 6,755$ mil m^3 . Což odpovídá relativní nejistotě $\pm 9,2 \%$. S použitím řady 1935 až 2020 jsou výsledky pro staré batygrafické křivky $O_p = 4,400 m^3s^{-1}$, $\mu(V_z) = 79,582$ mil m^3 , hodnota $\pm 2\sigma(V_z) = 4,269$ mil m^3 , což je relativní nejistota $\pm 5,364\%$. Pro nové křivky a objem je výsledek $O_p = 4,29 m^3s^{-1}$, $\mu(V_z) = 73,679$ mil m^3 , hodnota $\pm 2\sigma(V_z) = 3,990$ mil m^3 , což je relativní nejistota $\pm 5,4\%$.
- Výsledky výpočtu úlohy 2 s uvažováním nejistot byly následující. Nejbližší výsledky $\mu(P_t)$ k hodnotě 99,5% pro délku řady 1935 až 2000, $V_{z,max} = 79,668$ mil. m^3 a staré batygrafické křivky byly pro $O_p = 5,55 m^3s^{-1}$, $\mu(P_t) = 99,507\%$ a hodnota $\pm 2\sigma(P_t) = 0,275 \%$. Tedy P_t může nabývat intervalu 99,232% až 99,782%. Při použití řady 1935 až 2020, stejném V_z a starých batygrafických křivek je výsledek $O_p = 4,850 m^3s^{-1}$, $\mu(P_t) = 99,518\%$ hodnota $\pm 2\sigma(P_t) = 0,086 \%$, P_t může nabývat intervalu 99,432% až 99,604%.
- Při výpočtech úlohy 2 s použitím období 1935 až 2000, $V_{z,max} = 73,624$ mil m^3 a nových křivek je $O_p = 5,400 m^3s^{-1}$, $\mu(P_t) = 99,512\%$ a hodnota $\pm 2\sigma(P_t) = 0,259 \%$. P_t může nabývat intervalu 99,253% až 99,771%. Při použití řady 1935 až 2020 je pak $O_p = 4,78 m^3s^{-1}$, $\mu(P_t) = 99,508\%$ a hodnota $\pm 2\sigma(P_t) = 0,464 \%$. Interval možných hodnot P_t je 99,044% až 99,972%.

Provedení analýzy jasně ukazuje, že vliv změny batygrafických křivek je k hodnotám nadlešených průtoků minimální a pohybuje se v řádu 2%. Avšak vliv aktualizovaných hydrologických vstupů v podobě aktuální řady průměrných měsíčních průtoků do roku 2020 ukazuje přibližně 17% rozdíl oproti neaktualizovaným hodnotám do roku 2000. Jasně se ukazuje, že změna hydrologických podmínek toku v podobě snížení vydatnosti průtoků má na zásobní objem nádrže Vranov nejvýznamnější vliv.

Uvažování nejistot morfologických a hydrologických vstupních dat ovlivňuje výsledky výpočtů zásobního objemu nádrže a jejich zabezpečení. Pokud nebudou nejistoty do analýz vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže uvažovány, může dojít k podhodnocení velikosti zásobního objemu, nebo špatnému vyčíslení zabezpečení a nevhodnému zatřídění významnosti zásobního objemu dle normy ČSN 75 2405 [9].

Z tohoto důvodu průběžné sledování vývoje vstupních parametrů do výpočtu a přepočty zásobního objemu nádrže jsou důležité a pro provoz nádrže ve své podstatě nepostradatelné. Uvažování nejistot ve výpočtu, pak ukazuje i potenciál, jak analýzu modernizovat a detailněji interpretovat. Jak zahrnout, případně redukovat nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže a zamezit tím možným budoucím výpadkům respektive poruchám v řízení vodních nádrží.

Literatura

- [1] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O.Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR - 1. aktualizace pro období 2021 – 2030. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2021. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/>.
- [3] Národní akční plán adaptace na změnu klimatu - 1. aktualizace pro období 2021 - 2025. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2021. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/>.
- [4] Manipulační řád pro VD Vranov na řece Dyji v km 175,405 na řece Svatce. Povodí Moravy s.p. 2011.
- [5] MARTON, D.; JÍLEK, D. Posouzení zásobního objemu nádrže Vranov na aktualizovaná vstupní data. In Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2022. 1. Brno: Povodí Moravy, s.p. Brno, 2022. s. 22-26. ISBN 978-80-907141-6-8.
- [6] JÍLEK, D. Posouzení zásobního objemu nádrže Vranov v kontextu vývoje morfologie dna nádrže a hydrologických prvků povodí. Diplomová práce. Brno: VUT FAST v Brně, 2023. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [7] MARTON, D.; STARÝ, M.; MENŠÍK, P.: UNCERESERVOIR; UNCERESERVOIR – Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže. <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software>.
- [8] STARÝ, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01), VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2006.
- [9] Česká technická norma ČSN 75 2405 Vodohospodářské řešení vodních nádrží, ICS 93.160; 13.060.10, Český normalizační institut, Praha 2004.
- [10] MARTON, D., STARÝ, M., MENŠÍK, P., The Influence of Uncertainties in the Calculation of Mean Monthly Discharges On Reservoir Storage, Journal of Hydrology and Hydromechanics. Volume 59, Issue 4, Pages 228–237, ISSN (Print) 0042-790X, DOI: 10.2478/v10098-011-0019-3, November 2011.
- [11] MARTON, D., STARÝ, M., MENŠÍK, P. Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 63(4), 2015. 287-294. ISSN: 0042-790X.