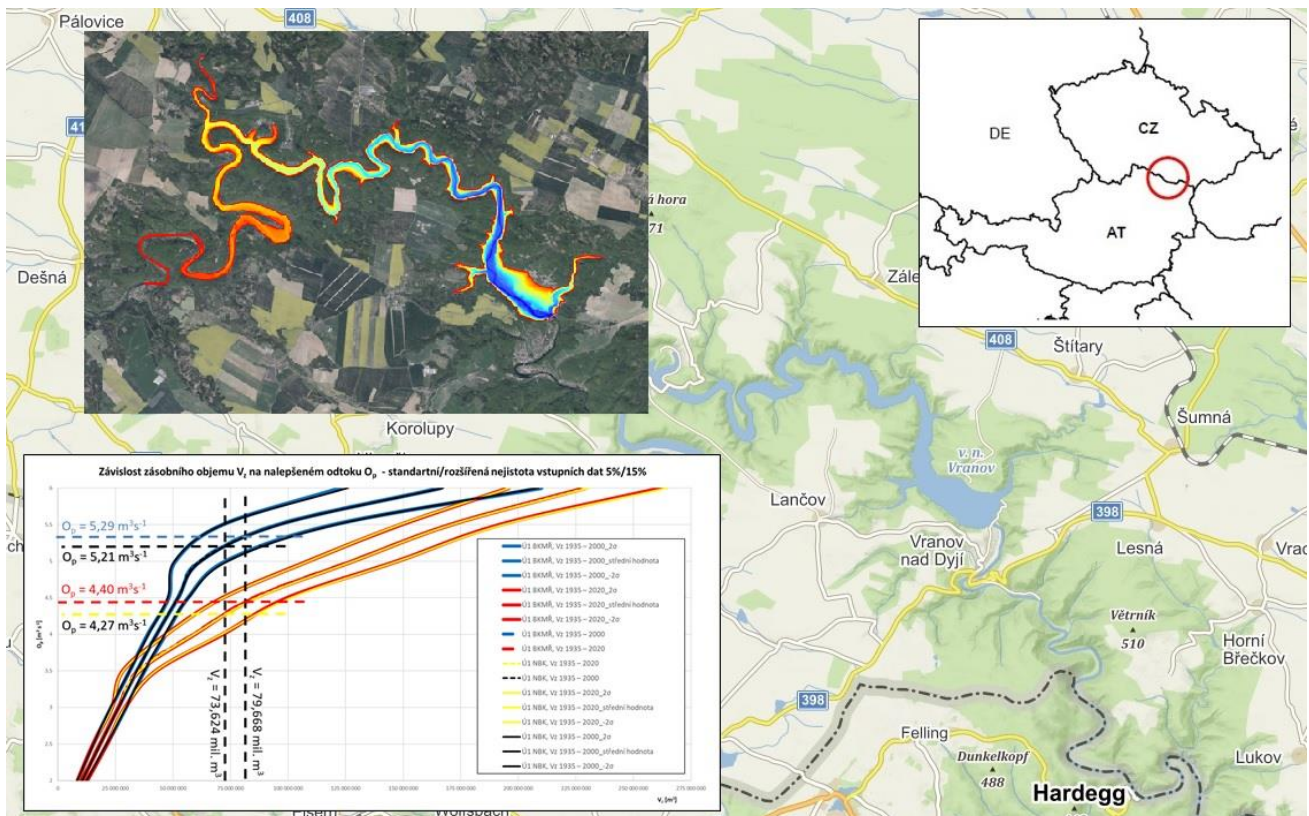


# „A.T3.2.1 Analyse des Wassermanagements in Stauräumen unter Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren“ Abschlussbericht

SEDECO (ATCZ 28)  
Work package T3





**Project coordination:**

**Helmut Habersack<sup>1</sup>, Daniel Marton<sup>2</sup>, Ludmila Kovářová,<sup>3</sup> Jürgen Gruber<sup>4</sup>**

**Author: Daniel Marton<sup>2</sup>**

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**

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

<sup>2</sup> Vysoké učení technické v Brně  
Faculty of Civil Engineering  
Institute of Landscape Water Management

<sup>3</sup> Povodí Moravy, s.p.

<sup>4</sup> BOKU - Wasserbaulabor Errichtungs- und Betriebs-Gesellschaft m.b.H.

<sup>5</sup> 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 an 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.

## Inhalt

Abstrakt CZ .....	1
1 Einleitung und Zielsetzung .....	4
2 Methodologie .....	5
3 Beschreibung des Projektgebietes und die Inputdaten .....	6
4 Praktische Anwendung .....	9
5 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	14
6 Fazit .....	16
7 Literaturverzeichnis .....	19



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass der Klimawandel ein zunehmend bedeutendes Problem darstellt, das die Umwelt und die menschliche Gesellschaft beeinflusst. In seinem 6. Sachstandsbericht stellt der IPCC fest, dass „es so gut wie sicher ist, dass sich die Atmosphäre, die Ozeane und das Land aufgrund menschlicher Aktivitäten erwärmen. Es gibt großräumige und schnelle Veränderungen in der Atmosphäre, im Ozean, in der Kryosphäre und in der Biosphäre“ [1]. Es ist klar, dass der allmähliche Klimawandel auch direkte Auswirkungen auf die hydrologischen Bedingungen in Einzugsgebieten und die damit verbundene Bewirtschaftung von Oberflächen- und Grundwasserressourcen hat. Auch die strategischen Dokumente Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in den Bedingungen der Tschechischen Republik [2] und der Nationale Aktionsplan zur Anpassung an den Klimawandel [3], die 2015 von der Regierung der Tschechischen Republik genehmigt und 2017 und 2021 aktualisiert wurden, stellen die Frage der effizienten Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter mögliche Anpassungsmaßnahmen. In [2] wird die Bewertung der Funktionsvolumina bestehender Stauseen als eine der Anpassungsmaßnahmen beim Management von Oberflächenressourcen im Kampf gegen den Klimawandel ausgesteckt. Daher sind genaue Informationen über das verfügbare Wasservolumen im Stausee zusammen mit der Aktualisierung meteorologischer, morphologischer, hydrologischer Daten und mit der Entwicklung neuer Methoden zur Analyse des Stauraumvolumens in dem oben genannten Zusammenhang von höchster Relevanz.

Das Ziel des Abschlussberichts ist es, den Detailoutput A.T3.2.1 „Analyse des Wassermanagements in Stauräumen unter Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren“ als das geplante Ergebnis des Arbeitspakets T3 „Hochwasser und Dürre“ zu erstellen. Der Bericht beschreibt die Ergebnisse der Analyse des Stauraumvolumens im Stausee Vranov. Die Analyse erfolgte auf Basis von Daten gemäß der Betriebsvorschrift 2011 [4] und aktualisierten morphologischen und hydrologischen Inputdaten bis in die Gegenwart. Die morphologischen Daten wurden durch die letzte Sohlenvermessung im Stausee Vranov aus dem Jahr 2021 und die neu erstellten bathygraphischen Kurven des Stausees ermittelt, die Teil der Detailoutputs im Arbeitspaket T1 Sedimenttransport und -management, Aktivität A.T1.2 Monitoring der Dynamik der Stauraumsohle. Die hydrologischen Daten werden mit den neuesten frei verfügbaren Messungen bis 2020 fortgeschrieben 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. Die Ergebnisse der Analyse werden in Form einer deterministischen Lösung sowie statistisch aufbereitet, d.h. unter Berücksichtigung der Messungsunsicherheit von Inputdaten und der daraus resultierenden Unsicherheiten in den Outputwerten der Betriebsraumvolumina und der Abflusssicherheiten.

Der Abschlussbericht erweitert die Ergebnisse, die in der Veröffentlichung [5] einer breiten Fachöffentlichkeit in der Tagung „Vodní nádrže 2022“ vorgestellt wurden. Detaillierte Berechnungen und Analysen sind auch in der Diplomarbeit [6] bearbeitet.

## 2 Methodologie

Die Ableitung der bathygraphischen Kurven erfolgte mittels der Software ArcGIS ArcMap, die in der Lage ist, ein digitales Geländemodell (DMT) in Form eines georeferenzierten Rasters zu erstellen. Das Ableitungsverfahren war folgend: Zuerst Festlegen des einleitenden Koordinatensystems JTSK Krovak EastNorth-, dann Einlesen der Punkte in die dBase-Datei mittels ArcToolbox Conversion Tools/To dBase und anschließend Zusammenführen in einer Datei mit Data Management Tools/General/Merge. Darauf folgt die Erstellung einer Rasterschicht für das Gelände und die Stauraumsohle aus den Messpunkten mittels Conversion Tools/To Raster/Point to Raster und die Erstellung eines digitalen Höhenmodells (DEM) und eines Höhenschichtmodells mittels Funktionen Spatial Analyst Tools/Interpolation/Topo to Raster sowie Surface/Contour. Zuletzt werden dann die Wasservolumina für jeweilige Höhenschichtwerte berechnet. Das detaillierte Bearbeitungsverfahren ist den Zwischenberichten zu entnehmen: i) Bericht zur Berichtsperiode 7 „Sohlmodellierung und Berechnung des Stauraumvolumens mit ArcGIS-Software“ und ii) Bericht zu den Berichtsperioden 10 und 11 „Erstellung eines digitalen Geländemodells der Vranov-Stauraumsohle aufgrund der Vermessung und der anschließenden Analyse der bathygraphischen Linien“.

Die Wassermanagementanalyse der Speicherfunktion des Stausees erfolgte mit der Software UNCERESERVOIR [7]. Die Software berechnet zwei grundlegende Aufgaben der Simulation des Speicherbetriebs, nämlich die Berechnung des Betriebsraumvolumens  $V_z$  mit Sicherheit entsprechend der Dauer  $P_t = 100\%$  (Aufgabe 1) und die Ermittlung der Abflussanreicherung aus dem Speicher  $O_p$  für gegebenes  $V_z$  und  $P_t < 100\%$  (Aufgabe 2). Die Software kann beide Aufgaben sowohl deterministisch als auch statistisch bzw. stochastisch berechnen, d.h. unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Inputdaten. Das Programm basiert auf dem von Starý in [8] beschriebenen Simulationsmodell des Stauraumverhaltens. Der Softwarealgorithmus basiert auf einer modifizierten Stauraumgleichung in Summenform, die durch eine Bedingung des Ungleichungstyps eingeschränkt wird. Die Sicherheitsberechnung erfolgt nach der klassischen Beziehung nach Čegodajev, siehe [8] und die Norm ČSN 75 2405 [9], wo die Sicherheit anhand der Dauer  $P_t$  und der nicht zugeführten Wassermenge  $P_d$  bestimmt wird. Das Simulationsmodell bezieht auch Wasserverluste aus dem Speicher in die Berechnungen ein. Die Verluste werden in Form des Verdunstungsverlustes von der Wasseroberfläche und der Versickerung durch den Dammkörper angegeben. Die Verluste werden mit einem Iterativverfahren berechnet. Unsicherheiten in den Inputdaten werden in



die Berechnungen unter Verwendung der in [10] und [11] ausführlich beschriebenen Monte-Carlo-Methode eingebracht.

### 3 Beschreibung des Projektgebietes und die Inputdaten

Der Stausee Vranov befindet sich in dem Kreis Südmähren zwischen Podhradí nad Dyjí und Vranov nad Dyjí an dem 175,41 km Flusskilometer der Thaya (Dyje), siehe Abbildung 1. Die Hauptzwecke des Stauseebetriebs sind Wasserversorgung, Wasserkraft, Erholung, Fischerei, Schifffahrt und Hochwasserschutz. Die Stauanlage wird von dem Staatsunternehmen Povodí Moravy betrieben. Der Stauraum hat einen Gesamtvolumen von 132,6 Mio. m<sup>3</sup> Wasser. Davon betragen der Reserveraum  $V_s$  31,840 Mio. m<sup>3</sup>, der Betriebsraum  $V_z$  79,668 Mio. m<sup>3</sup>, der beherrschbare Rückhalteraum  $V_{ro}$  11,157 Mio. m<sup>3</sup> und der unbeherrschbare Rückhalteraum  $V_{rn}$  10,031 Mio. m<sup>3</sup>. Das Absperrbauwerk ist als Gewichtsstaumauer aus Beton ausgeführt, die Dammhöhe beträgt 59,9 m bei einer Kronenlänge von 290,5 m. Die Stauanlage wurde 1934 in Betrieb genommen. Das Einzugsgebiet oberhalb des Stausees hat eine Fläche von 2.211,80 km<sup>2</sup> und die Hauptzuflüsse zum Stausee sind die Thaya und die Želetavka. Der mittlere langjährige Durchfluss  $Q_a$  beträgt 9.740 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Der Jahreswert der Verdunstung vom Wasserspiegel  $E_a$  bei einer überstauten Fläche von 55.880 ha auf einer Seehöhe von 348,45 m NN beträgt 650 mm/Jahr [4].



Abb. 1 – Stausee Vranov.

Die verwendeten morphologischen Daten in Form von bathygraphischen Kurven stammen einerseits aus der Betriebsvorschrift für die Stauanlage [4], andererseits wurden auch Daten aus der neuen Stauraum-Sohlenvermessung, die von dem PP3 Povodí Moravy, s.p. im Jahr 2021 und anschließend von dem PP2 BUT FCE einbezogen.

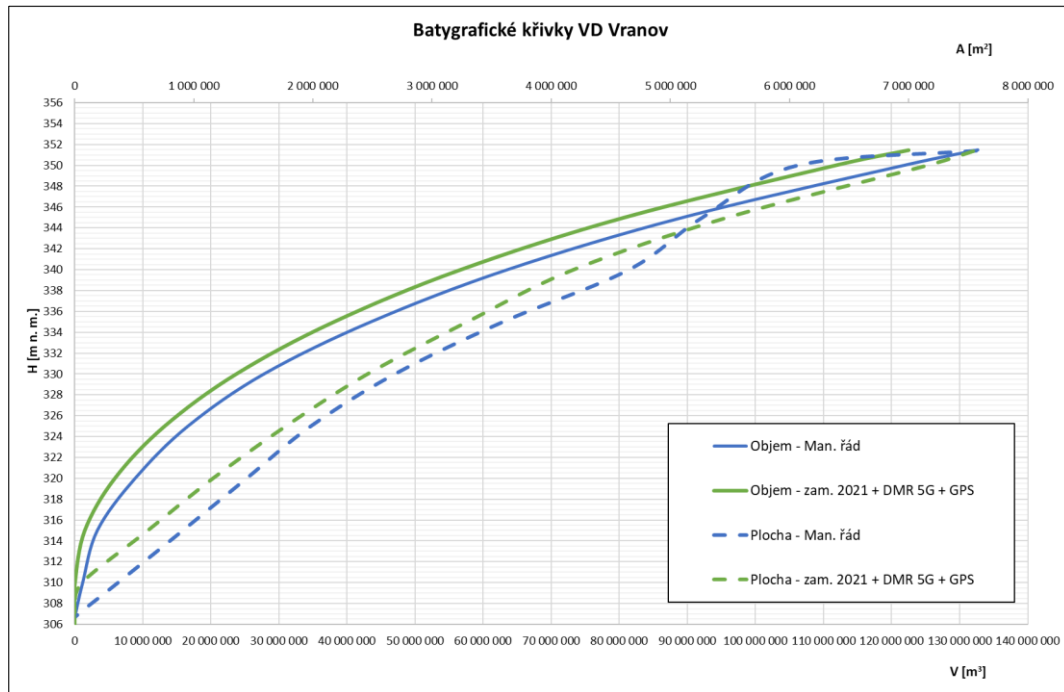
Insgesamt bestand die Stauraum-Sohlenvermessung aus drei Datensätzen. Das erste enthielt rohe Datensätze von der Sohlenvermessung mit einem Echolot-Messboot in Form von Textdateien aus drei Messkampagnen. Die Daten enthielten die XY-Koordinaten im GPS- und UTM-Koordinatensystem WGS84 32N und die den einzelnen Messpunkten zugeordnete Wassertiefe. Die Z-Koordinate der Sohlen-Messpunkte wurde durch Subtrahieren der gemessenen Wassertiefe des jeweiligen Messpunktes von der Höhenlage des Wasserspiegels während der Messung erhalten. Der zweite Datensatz waren Basisdaten zur Höhenlage der angrenzenden Umgebung des Stausees im digitalen Reliefmodell der fünften Generation ZABAGED – DMR 5G. Der dritte Datensatz enthielt zusätzliche Daten aus der manuellen Nachvermessung der noch nicht gemessenen Uferlinien mit einem GPS-Messgerät. Arbeitsverfahren mit den Daten, Nachvermessungen, Bearbeitungsmethodik sowie die eigentliche Datenbearbeitung wurden in den Zwischenberichten zu den Berichtsperioden 10 und 11 „Erstellung eines digitalen Geländemodells der Vranov-Stauraumsohle aufgrund der Vermessung und der anschließenden Analyse der bathygraphischen Linien“ ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse in Form von Tabellenwerten der bathygraphischen Kurven für die Betriebsvorschrift, die Vermessung vom Messboot 2021 kombiniert mit DMR, die präzisierte Vermessung 2021 + DMR + GPS sowie die Wertedifferenz der Betriebsvorschrift und der Vermessung 2021 + DMR + GPS sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

**Tabelle 1.** Werte der bathygraphischen Kurven für die Betriebsvorschrift, Vermessung 2021, präzisierte Vermessungen 2021 + DMR 5G und 2021 + DMR 5G + GPS.

Betriebsvorschrift			Vermessung + DMR 5G			Vermessung + DMR 5G + GPS			Differenz		
Höhe	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Höhe	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Höhe	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Höhe	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
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

In Abbildung 2 sind die bathygraphischen Kurven des Stausees Vranov grafisch dargestellt. Die blaue und grüne volle Linie stellen die Linien der Stauinhalte für die Betriebsvorschrift

und die Vermessung 2021 dar. Die blaue und grüne gestrichelte Linie stellen die Linien der überstauten Flächen für die Betriebsvorschrift und die Vermessung 2021 dar



**Abb. 2** - Bathygraphische Kurven für den Stausee Vranov.

Die verwendeten hydrologischen Daten enthielten Angaben zu den monatlichen Durchschnittsabflüssen  $Q_m$  an den Messstellen Dyje/Travní Dvůr und Želetavka/Vysočany mit Messaufzeichnungen von 1935 bis 2020. Sie beinhalten somit auch die extreme Trockenperiode 2015–2018. Die Daten sind für nichtkommerzielle Zwecke kostenlos abrufbar von der Website des Tschechischen Hydrometeorologischen Instituts ([www.chmi.cz](http://www.chmi.cz)). Die Zeitreihe durchschnittlicher Monatszuflüsse in den Vranov-Stausee ist in Abbildung 3 dargestellt.

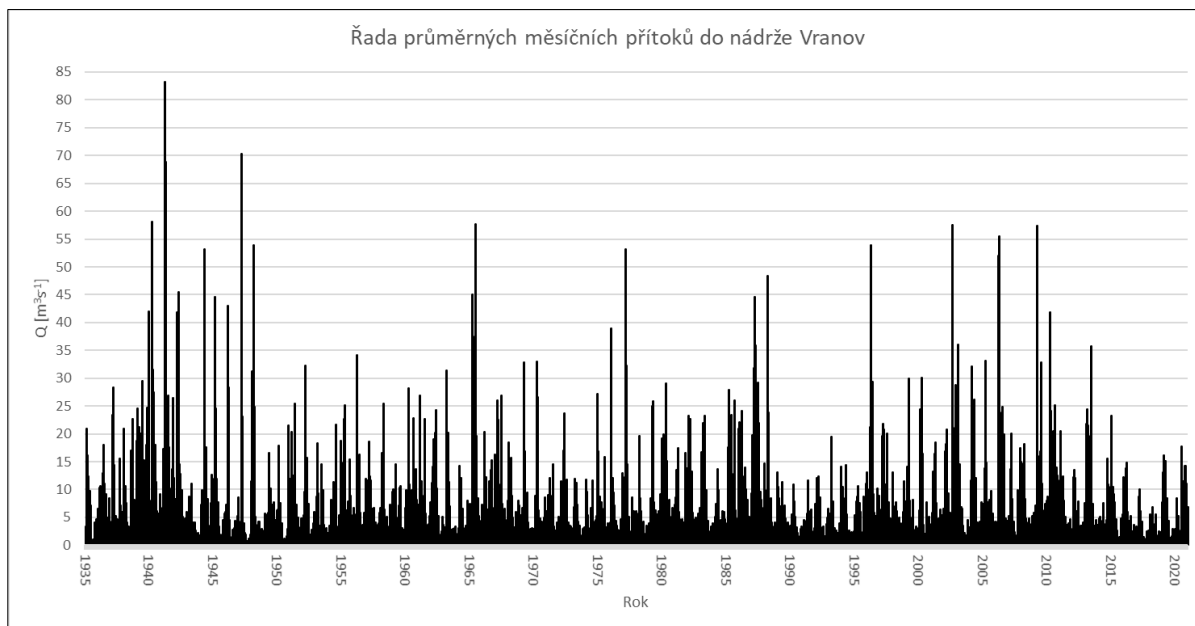


Abb. 3 – Zeitreihe durchschnittlicher Monatszuflüsse in den Stausee Vranov 1935 bis 2020.

#### 4 Praktische Anwendung

Der erste Schritt der praktischen Anwendung war die Differenzberechnung in Form einer relativen Änderung der Volumina der bathygraphischen Kurven für die Betriebsvorschrift und die präzisierte Vermessung 2021 + DMR 5G + GPS, siehe Tabelle 2.

**Tabelle 2.** Werte der bathygraphischen Kurven und relative Änderung der Volumina für die Betriebsvorschrift und die präzisierte Vermessung 2021 + DMR 5G + GPS.

Höhe [m n.m.]	Betriebsvorschrift		Vermessung 2021 + DMR 5G + GPS		Relative Änderung der Volumina [%]
	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	
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
<b>351,46</b>	<b>132 696 000</b>	<b>7 625 000</b>	<b>122 468 778</b>	<b>7 566 308</b>	<b>-7,7</b>

Anhand der obigen Daten wurden anschließend die geänderten Werte der Funktionsvolumina  $V_{2021}$  von der Vermessung 2021 + DMR 5G + GPS subtrahiert und die relativen Änderungen von Teilfunktionsvolumina im Vergleich zu den Funktionsvolumina aus der Betriebsvorschrift  $V_{MR}$  berechnet, siehe Tabelle 3.

**Tabelle 3.** Werte der Funktionsvolumina des Stausees Vranov für die Betriebsvorschrift und die präzisierte Vermessung 2021 + DMR 5G + GPS.

	H [m NN]	$V_{MR}$ [m <sup>3</sup> ]	$V_{2021}$ [m <sup>3</sup> ]	Relative Änderung 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

Die Analyse des Wassermanagements für den Betriebsraum des Stausees wurde für beide grundlegenden Aufgaben 1 und 2 berechnet. Die Abflussanreicherung aus dem Stausee  $O_p$  war über alle Monate des Jahres konstant. Die Variationsbreite des Betriebsraumvolumens in der Aufgabe 2 bestand aus den Werten des vollen Betriebsraumvolumens  $V_{z,max}$  79.668.000 m<sup>3</sup> und des Volumens nach Entleerung laut der Betriebsvorschrift sowie  $V_{z,max}$  73.623.860 m<sup>3</sup> und des Volumens nach Entleerung laut der Vermessung 2021+ DMR 5G + GPS.

In die Berechnung wurden zunächst die ursprünglichen bathygraphischen Kurven aus der Betriebsordnung und eine Reihe der monatlichen Durchschnittsabflüsse für die Jahre 1935 bis 2000 und 1935 bis 2020 eingesetzt. Das Betriebsraumvolumen wurde für  $V_{z,max}$  79.668.000 m<sup>3</sup> und  $V_{z,max}$  73.624.000 m<sup>3</sup> bewertet. Die Ergebnisse sind folgend benannt: 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. Weiters wurden die gleichen Aufgaben gelöst, allerdings unter Verwendung neuer bathygraphischer Kurven, die aus den Messungen in 2021 abgeleitet und folgend benannt wurden: 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. Alles deterministisch gelöst, unter Berücksichtigung des Verdunstungsverlustes  $E_a = 650$  mm/Jahr.

Anschließend wurde die gleiche Berechnung der Aufgaben 1 und 2 unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Inputdaten durchgeführt, wobei die Unsicherheit für die Eingangsparameter Wasserzufluss in den Stausee, bathygraphische Kurve und Verdunstung einheitlich als Standardunsicherheit von 5 % bzw. als erweiterte Unsicherheit von 15 % in die Berechnung eingeführt wurde. Die Wiederholungszahl der Generierung zufälliger Eingangsparameter nach der Monte-Carlo-Methode betrug  $PO = 300$ . Die Ergebnisse sind in Form statistischer Kennwerte des Mittelwerts  $\mu(V_z)$ ,  $\mu(P_t)$  und der zweifachen Standardabweichung  $\pm 2\sigma(V_z)$ ,  $\pm 2\sigma(P_t)$  dargestellt, die 95% Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Zufallsgröße abdeckt.

Um die Darstellung der Analyse zu vereinfachen, werden die Ergebnisse zu übersichtlichen grafischen Abhängigkeiten, sogenannten Bezugskurven, verarbeitet. In der Aufgabe 1 beschreiben die Kurven die Abhängigkeit zwischen dem Betriebsraumvolumen  $V_z$  und der



Abflussanreicherung  $O_p$ . In der Aufgabe 2 beschreiben die Kurven die Abhängigkeit zwischen den Sicherheiten anhand der Wasserabflussdauer  $P_t$  und der Abflussanreicherung  $O_p$ .

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse der Berechnung der Aufgabe 1 als Abhängigkeit des Betriebsraumvolumens  $V_z$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  für die deterministische und statistische Lösung.

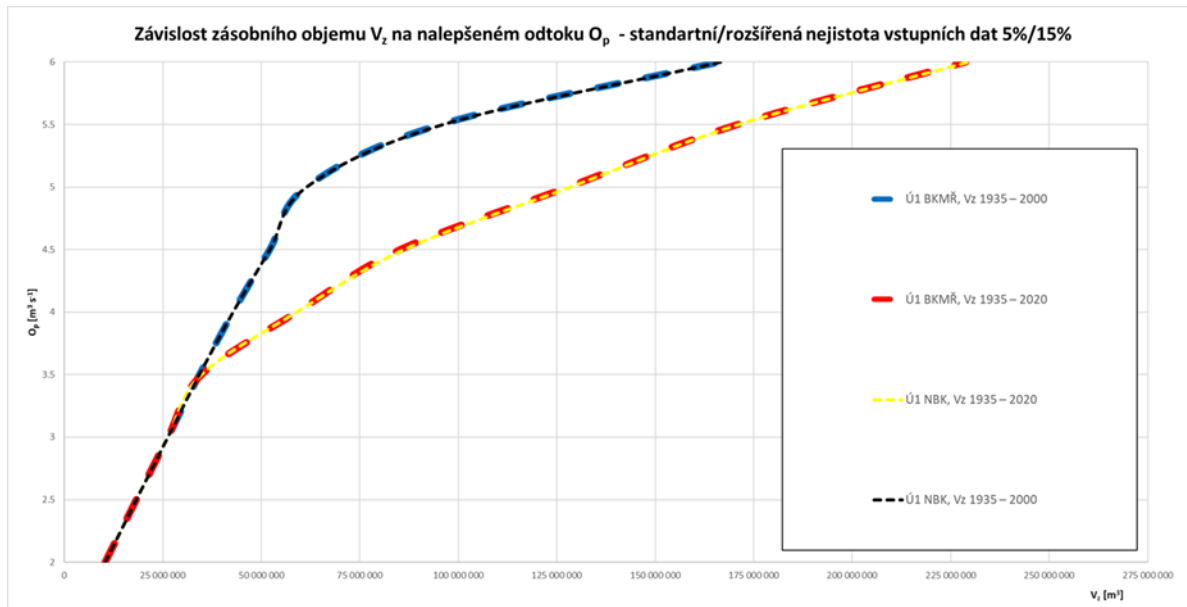


Abb. 4 – Abhängigkeit des Betriebsraumvolumens  $V_z$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  – deterministische Lösung.

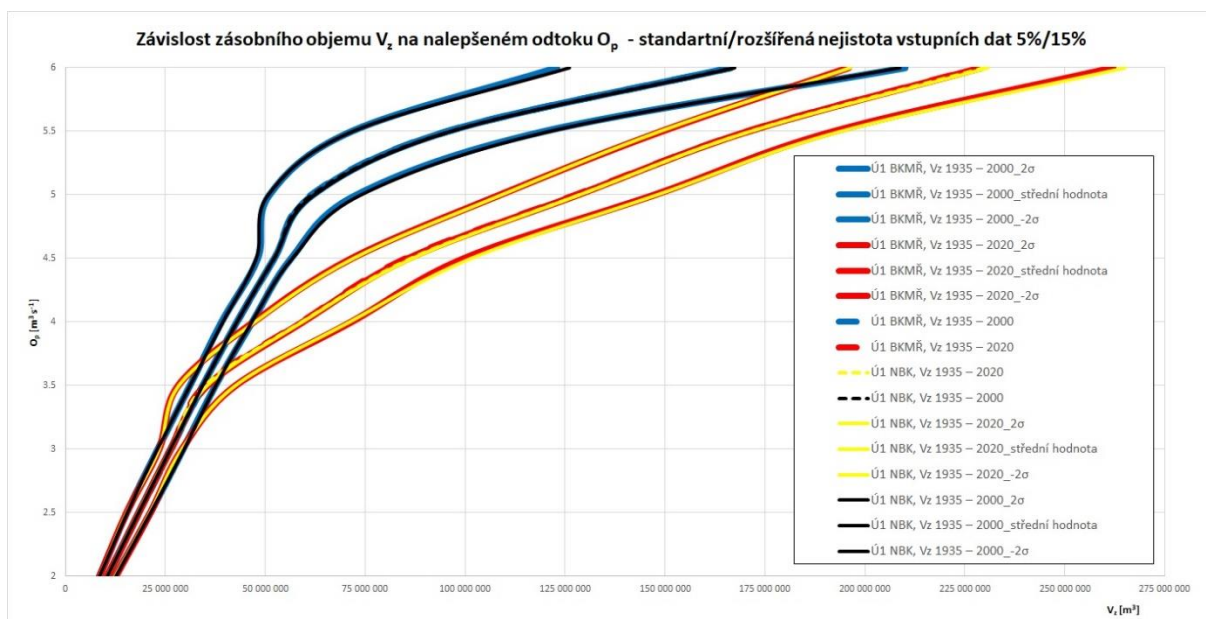


Abb. 5 – Abhängigkeit des Betriebsraumvolumens  $V_z$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  – statistische Lösung.



Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Ergebnisse der Berechnung der Aufgabe 2 als Abhängigkeit der Sicherheiten anhand der Wasserabflussdauer  $P_t$  und der Abflussanreicherung  $O_p$  für die deterministische und statistische Lösung sowie den Grenzwert des Betriebsraumvolumens  $V_{z,max}$  79.668.000 m<sup>3</sup>.

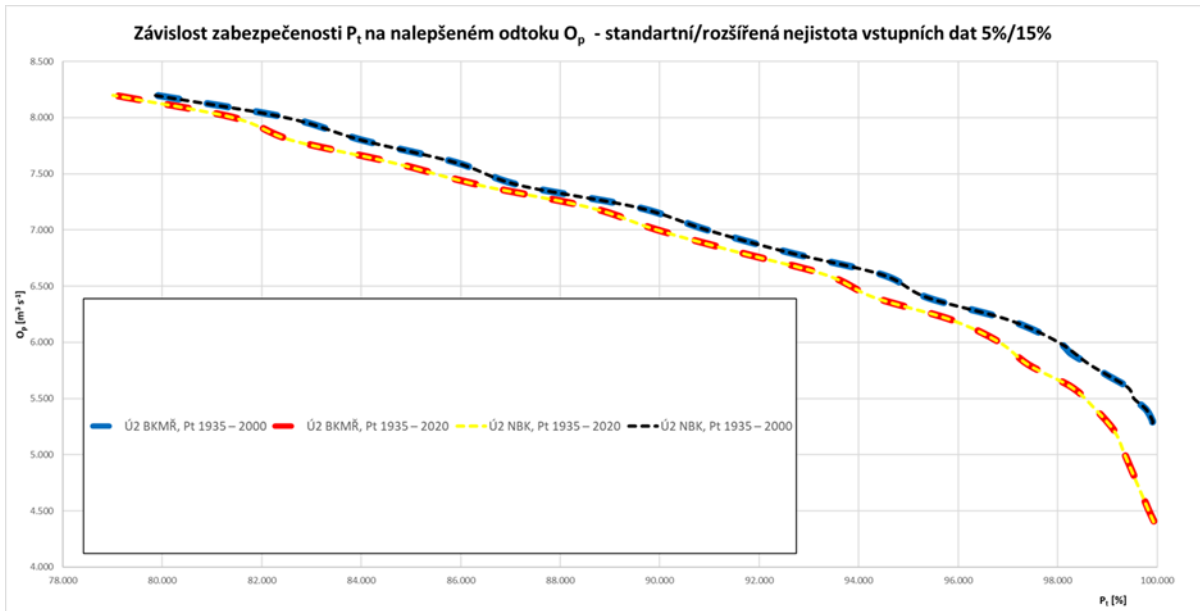


Abb. 6 – Abhängigkeit der Sicherheit  $P_t$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  für  $V_z = 79,668$  Mio. m<sup>3</sup> – deterministische Lösung.

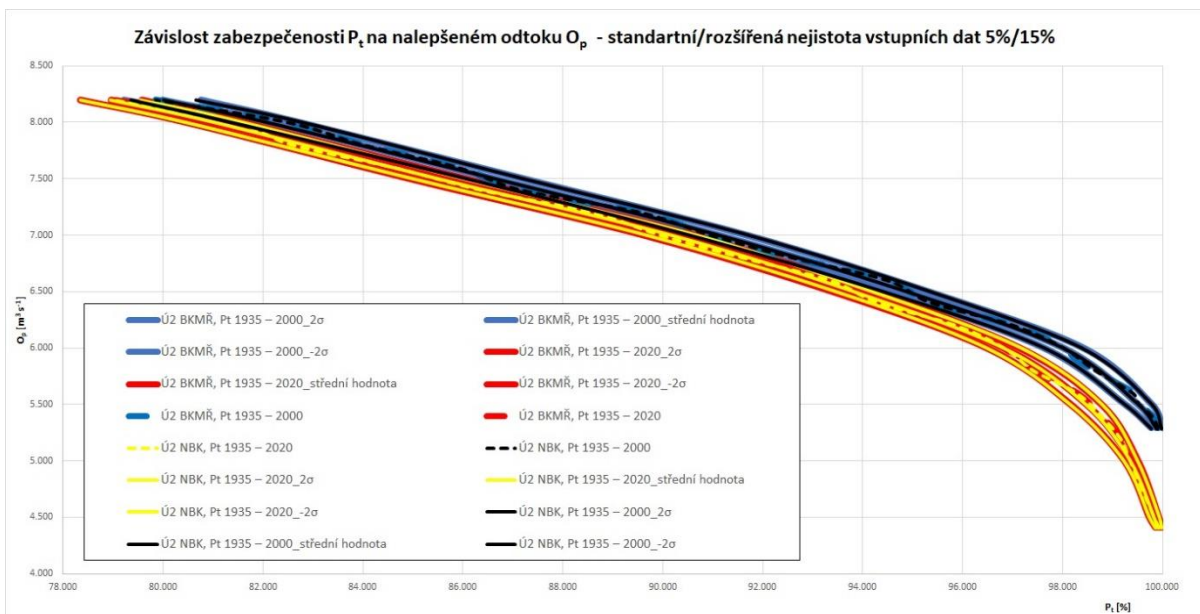


Abb. 7 – Abhängigkeit der Sicherheit  $P_t$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  für  $V_z = 79,668$  Mio. m<sup>3</sup> – statistische Lösung.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Berechnung der Aufgabe 2 als Abhängigkeit der Sicherheiten anhand der Wasserabflussdauer  $P_t$  und der Abflussanreicherung  $O_p$  für deterministische und statistische Lösung sowie den Grenzwert

des Betriebsraumvolumens  $V_{z,max}$  73.624.000 m<sup>3</sup>. Dabei wurden die genannten Ergebnisse nur für die Berechnungsvarianten Ú2 NBK, P<sub>t</sub> 1935 – 2000 und Ú2 NBK, P<sub>t</sub> 1935 – 2020 ermittelt, weil die Berechnungen der Varianten unter Berücksichtigung der alten bathygraphischen Kurven gemäß der Betriebsordnung im Wesentlichen mit jenen in den Bildern gezeigten identisch sind.

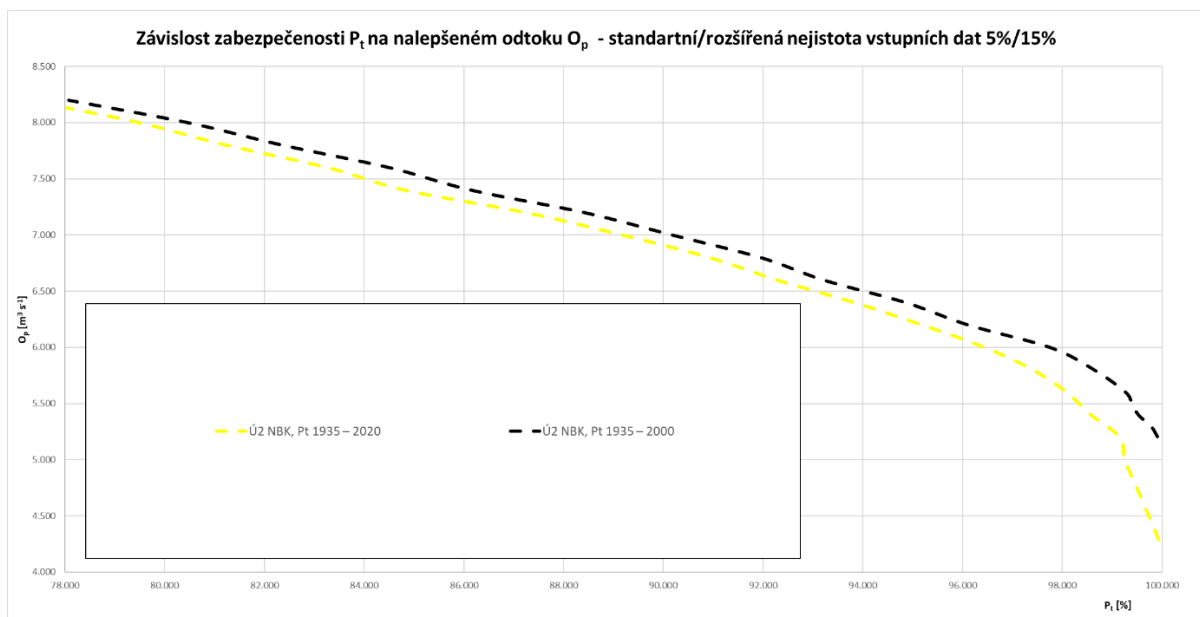


Abb. 8 – Abhängigkeit der Sicherheit P<sub>t</sub> von der Abflussanreicherung O<sub>p</sub> für V<sub>z</sub> = 73,624 Mio. m<sup>3</sup> – deterministische Lösung.

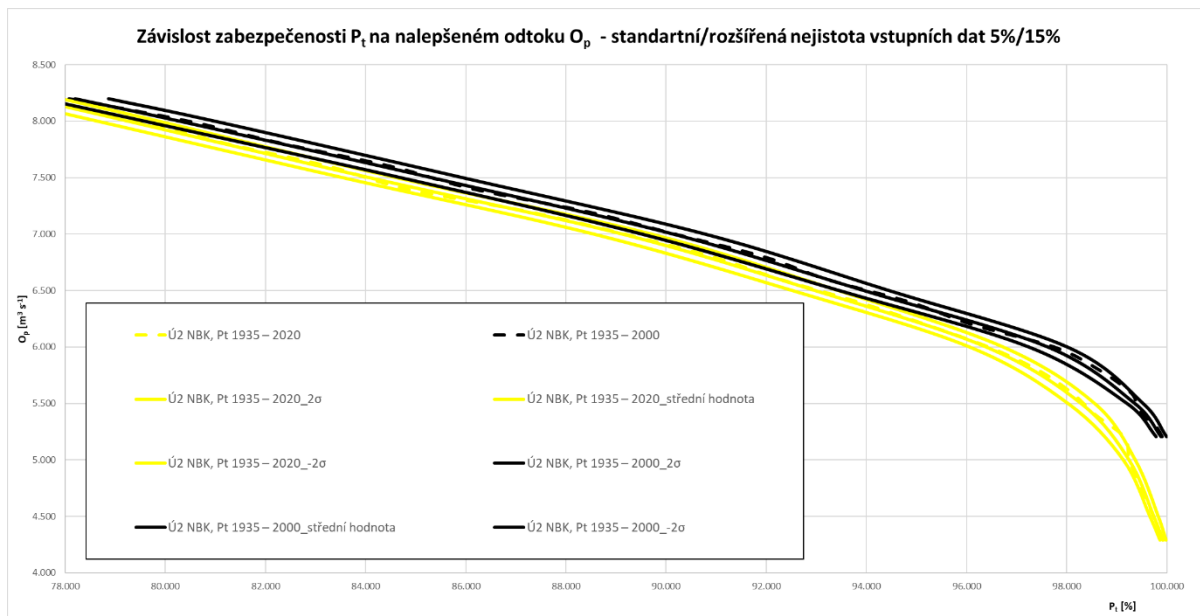
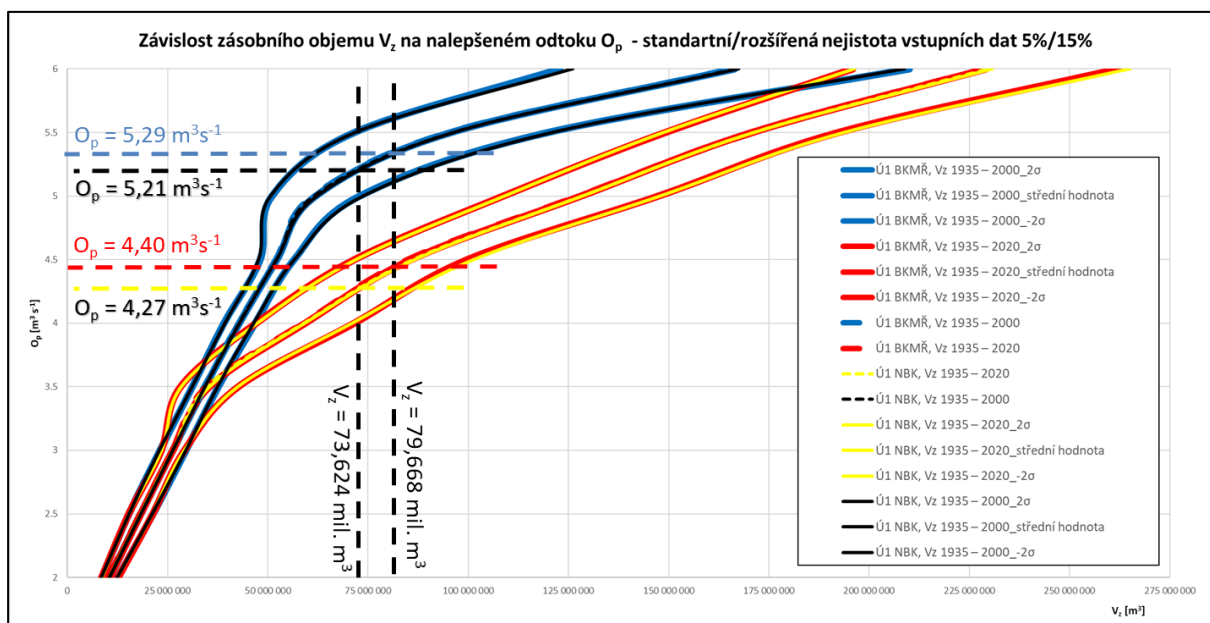


Abb. 9 – Abhängigkeit der Sicherheit P<sub>t</sub> von der Abflussanreicherung O<sub>p</sub> für V<sub>z</sub> = 73,624 Mio. m<sup>3</sup> – statistische Lösung.

## 5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Abbildung 10 zeigt vollständige Ergebnisse der Analyse des Wassermanagements für das Stauraumvolumen in der Aufgabe 1 als Diagramm der Abhängigkeit des Betriebsraumvolumens  $V_z$  von der Abflussanreicherung  $O_p$ . Für die deterministische Lösung und Varianten der alten und neuen bathygraphischen Kurven gilt eine blaue und rote gestrichelte Linie für den Zeitraum 1935 bis 2000 und eine schwarze und gelbe gestrichelte Linie für den Zeitraum 1935 bis 2020. Um die kombinierten Unsicherheiten des Wasserzuflusses in den Stausee, der bathygraphischen Kurven und der Wasserverdunstung für eine Standardunsicherheit von 5 % zu betrachten, werden die Ergebnisse mit einer vollen Linie dargestellt. Jeder der gedachten Linientripel bedeutet: i) die mittlere volle blaue und schwarze Linie sind die Mittelwerte des Betriebsraumvolumens  $\mu(V_z)$  und die blauen und schwarzen Hüllkurven sind Unsicherheiten in Form der Standardabweichung  $\pm 2\sigma(V_z)$  für den Zeitraum 1935 bis 2000, ii) die mittlere volle gelbe und rote Linie sind  $\mu(V_z)$  und die Hüllkurven sind Unsicherheiten in Form von  $\pm 2\sigma(V_z)$  für den Zeitraum 1935 bis 2020. Ebenfalls angegeben sind die Ergebnisse der exakten Werte der Abflussanreicherung  $O_p$  für das Betriebsraumvolumen  $V_z = 79.668.000 \text{ m}^3$  und  $V_z = 73.624.000 \text{ m}^3$ .

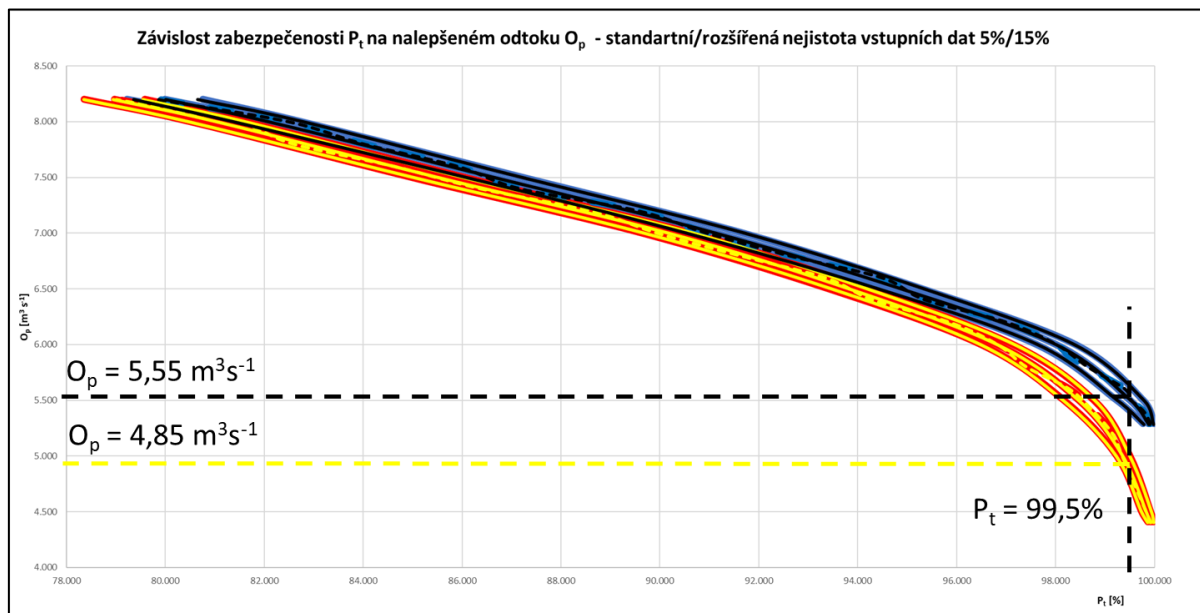


**Abb. 10** – Abhängigkeit des Betriebsraumvolumens  $V_z$  von der Abflussanreicherung  $O_p$ .

Die Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Aufgabe 2 als Abhängigkeit der Sicherheit anhand der Wasserabflussdauer  $P_t$  und der Abflussanreicherung  $O_p$  für den Grenzwert des Betriebsraumvolumens  $V_{z,\max} 79.668.000 \text{ m}^3$ . Die Beschreibung der Linien ist die gleiche wie in der Abbildung 10, nur für die Aufgabe 2 angewendet. Angegeben sind auch Ergebnisse der exakten Werte der Abflussanreicherung  $O_p$ , für die Signifikanzkategorie der Speichersicherheit der Klasse A ( $P_t \leq 95\%$ ) gemäß der Norm ČSN 75 2405 [9]. Die schwarze gestrichelte horizontale Linie entspricht dem  $O_p$ -Wert für die Aufgabenvarianten Ú2 BKMŘ  $P_t$

1935-2000 und Ú2 NBK  $P_t$  1935-2000. Die gelb gestrichelte horizontale Linie entspricht dem  $O_p$ -Wert für die Aufgabenvarianten Ú2 BKMŘ  $P_t$  1935-2020 und Ú2 NBK  $P_t$  1935-2020.

Die Abbildung 12 zeigt die gleichen Ergebnisse der Abhängigkeit  $P_t$  von  $O_p$  für den Grenzwert des Betriebsraumvolumens  $V_{z,max}$  73.624.000  $m^3$ . Die Beschreibung der Linien ist die gleiche wie in den Abbildungen 10 und 11. Angegeben sind auch Ergebnisse der exakten Werte der Abflussanreicherung  $O_p$  für die Signifikanzkategorie der Speichersicherheit der Klasse A ( $P_t \leq 95\%$ ) gemäß der Norm ČSN 75 2405 [9]. Die schwarze gestrichelte horizontale Linie entspricht dem  $O_p$  -Wert für die Aufgabenvariante Ú2 NBK  $P_t$  1935-2000. Die gelb gestrichelte horizontale Linie entspricht dem  $O_p$  -Wert für die Aufgabenvariante Ú2 NBK  $P_t$  1935-2020.



**Abb. 11** – Abhängigkeit der Sicherheit  $P_t$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  für  $V_z = 79,668$  Mio.  $m^3$ .

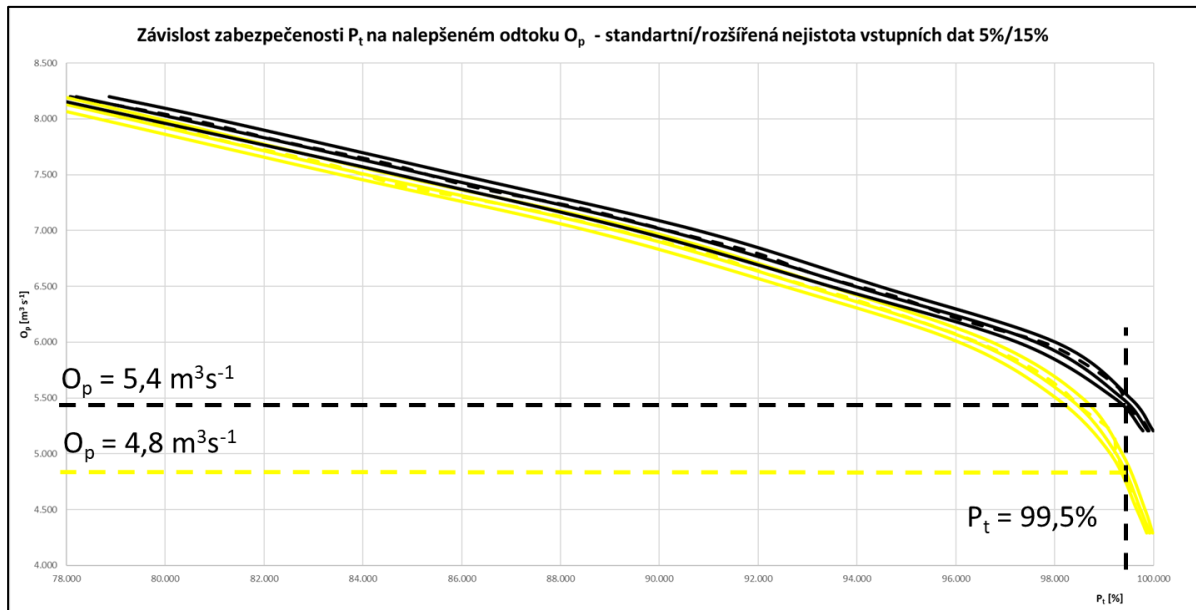


Abb. 12 – Abhängigkeit der Sicherheit  $P_t$  von der Abflussanreicherung  $O_p$  für  $V_z = 73,624$  Mio.  $m^3$ .

## 6 Fazit

Die präsentierten Ergebnisse lassen sich zu folgenden Schlussfolgerungen formulieren:

- Die Änderung des Gesamtvolumens des Stausees auf dem Wasserstand von 351,46 m NN beträgt 10,227 Mio.  $m^3$ , was einer relativen Änderung des Gesamtvolumens von 7,71 % entspricht. Das Reserveraumvolumen auf dem Wasserstand von 331,45 m NN verändert sich von 31,840 Mio.  $m^3$  auf 27,443 Mio.  $m^3$ , was einer Änderung von 4,4 Mio.  $m^3$  bzw. 13,81 % entspricht, und die Größe des Betriebsraumvolumens auf dem Wasserstand von 348,45 m NN sank von 79,668 Mio.  $m^3$  um 6 Mio.  $m^3$ , was 73,624 Mio.  $m^3$  und einer relativen Änderung von 7,59 % entspricht.
- Der Einfluss der neuen bathygraphischen Kurven auf das Betriebsraumvolumen und den Wasserabfluss ist nicht so signifikant wie der Einfluss der hydrologischen Reihe. Alles kann in der Aufgabe 1 in der deterministischen Lösung gezeigt werden: für den Wert von  $V_z = 79,668$  Mio.  $m^3$ , den Zeitraum 1935 bis 2000 und die alten bathygraphischen Kurven ist  $O_p = 5,290$   $m^3s^{-1}$  und für die neuen Kurven und das subtrahierte Volumen  $V_z = 73,624$  Mio.  $m^3$  ist  $O_p = 5,207$   $m^3s^{-1}$ . Für den Zeitraum 1935 bis 2020 und die alten bathygraphischen Kurven beträgt der Abflusswert  $O_p = 4,40$   $m^3s^{-1}$  und für die neuen Kurven und das Betriebsraumvolumen ist  $O_p = 4,29$   $m^3s^{-1}$ . In Prozent ausgedrückt beträgt der relative Einfluss der Tiefenänderung auf das Volumen -7,59 %. Die relative Änderung der Abflussanreicherung beträgt -1,57 % und -2,5 % und die relative Änderung der Abflussanreicherung zwischen den Zeiträumen 1935 bis 2000 und 1935 bis 2020 beträgt -16,82 % und -17,61 %.

- Die Ergebnisse der Aufgabe 2 in der deterministischen Lösung für den Grenzwert  $V_{z,max} = 79,668$  Mio.  $m^3$ , den Zeitraum 1935 bis 2000 und die alten bathygraphischen Kurven sind  $O_p = 5,53$   $m^3s^{-1}$  und  $P_t = 99,533$  %. Für die neuen Kurven ist  $O_p = 5,510$   $m^3s^{-1}$  und  $P_t = 99,533$  %. In dem Zeitraum 1935 bis 2020 ist  $O_p = 4,8$   $m^3s^{-1}$  für  $P_t = 99,545$  %.
- Die Ergebnisse der Aufgabe 2 in der deterministischen Lösung für den Grenzwert  $V_{z,max} = 73,624$  Mio.  $m^3$ , den Zeitraum 1935 bis 2000 und die alten und neuen bathygraphischen Kurven ist  $O_p = 5,410$   $m^3s^{-1}$  für  $P_t = 99,533$  %. In dem Zeitraum 1935 bis 2020 und für die alten bathygraphischen Kurven beträgt der Abflusswert  $O_p = 4,77$   $m^3s^{-1}$  für  $P_t = 99,545$  %, für die neuen Kurven  $O_p = 4,75$   $m^3s^{-1}$  für  $P_t = 99,545$  %.
- Die Ergebnisse der Berechnung der Aufgabe 1 unter Berücksichtigung von Unsicherheiten waren wie folgt. Die nächsten  $\mu(V_z)$ -Ergebnisse zum Wert von 79,668 Mio.  $m^3$  für die Reihenlänge 1935 bis 2000 und die alten bathygraphischen Kurven waren  $O_p = 5,290$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(V_z) = 79,608$  Mio.  $m^3$ ,  $\pm 2\sigma(V_z) = 6,845$  Mio.  $m^3$ . Das entspricht einer relativen Unsicherheit von  $\mu(V_z) \pm 8,6$  %. Für die neuen Kurven ist  $O_p = 5,207$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(V_z) = 73,631$  Mio.  $m^3$ ,  $\pm 2\sigma(V_z) = 6,755$  Mio.  $m^3$ . Das entspricht einer relativen Unsicherheit von  $\pm 9,2$  %. Unter Verwendung der Reihe 1935 bis 2020 sind die Ergebnisse für die alten bathygraphischen Kurven  $O_p = 4,400$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(V_z) = 79,582$  Mio.  $m^3$ ,  $\pm 2\sigma(V_z) = 4,269$  Mio.  $m^3$ , was einer relativen Unsicherheit von  $\pm 5,364$  % entspricht. Für die neuen Kurven und das Volumen ist das Ergebnis  $O_p = 4,29$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(V_z) = 73,679$  Mio.  $m^3$ ,  $\pm 2\sigma(V_z) = 3,990$  Mio.  $m^3$ , was einer relativen Unsicherheit von  $\pm 5,4$  % entspricht.
- Die Ergebnisse der Berechnung der Aufgabe 2 unter Berücksichtigung von Unsicherheiten waren wie folgt. Die nächsten  $\mu(P_t)$ -Ergebnisse zum Wert von 99,5 % für die Reihenlänge 1935 bis 2000,  $V_{z,max} = 79,668$  Mio.  $m^3$  und die alten bathygraphischen Kurven waren für  $O_p = 5,55$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(P_t) = 99,507$  % und  $\pm 2\sigma(P_t) = 0,275$  %. Somit kann  $P_t$  Werte in dem Bereich von 99,232 % bis 99,782 % annehmen. Unter Verwendung der Reihe 1935 bis 2020 bei demselben  $V_z$  und den alten bathygraphischen Kurven ist das Ergebnis  $O_p = 4,850$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(P_t) = 99,518$  % und  $\pm 2\sigma(P_t) = 0,086$  %,  $P_t$  kann Werte in dem Bereich von 99,432 % bis 99,604 % annehmen.
- In den Berechnungen der Aufgabe 2 unter Verwendung der Zeitreihe 1935 bis 2000,  $V_{z,max} = 73,624$  Mio.  $m^3$  und der neuen Kurven ist  $O_p = 5,400$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(P_t) = 99,512$  % und  $\pm 2\sigma(P_t) = 0,259$  %.  $P_t$  kann Werte in dem Bereich von 99,253 % bis 99,771 % annehmen. Unter Verwendung der Reihe 1935 bis 2020 ist  $O_p = 4,78$   $m^3s^{-1}$ ,  $\mu(P_t) = 99,508$  % und  $\pm 2\sigma(P_t) = 0,464$  %. Der Bereich der möglichen  $P_t$ -Werte beträgt 99,044 % bis 99,972 %.

Die Durchführung der Analyse zeigt deutlich, dass der Einfluss der Änderung der bathygraphischen Kurven auf die Werte der Abflussanreicherung minimal ist und in der Größenordnung von 2 % liegt. Allerdings weist der Einfluss der aktualisierten hydrologischen



Inputdaten in Form der aktuellen Reihe der monatlichen Durchschnittsabflüsse bis 2020 eine ca. 17%ige Differenz gegenüber den nicht aktualisierten Werten bis 2000 auf. Es zeigt sich deutlich, dass die Veränderung der hydrologischen Bedingungen in dem Gewässer in Form einer Verringerung der Durchflussmengen hat den größten Einfluss auf das Betriebsraumvolumen des Stausees Vranov.

Die Berücksichtigung der Unsicherheiten morphologischer und hydrologischer Inputdaten beeinflusst die Ergebnisse der Berechnungen des Betriebsraumvolumens und der Sicherheiten. Werden die Unsicherheiten bei den Analysen des Wassermanagements für das Betriebsraumvolumen des Stausees nicht berücksichtigt, kann es zu einer Unterschätzung der Größe des Betriebsraumvolumens oder einer falschen Berechnung der Sicherheit und einer falschen Einstufung der Bedeutung des Betriebsraumvolumens gemäß der Norm ČSN 75 2405 [9] kommen.

Aus diesem Grund sind eine kontinuierliche Überwachung der Entwicklung der Eingangsparameter für die Berechnung sowie Neuberechnungen des Betriebsraumvolumens enorm wichtig und für den Betrieb der Stauanlage zwingend erforderlich. Die Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Berechnung zeigt dann auch das Potenzial, die Analyse zu modernisieren und detaillierter zu interpretieren, sowie die Unsicherheiten, die in die Wassermanagementlösung des Betriebsraumvolumens eingehen, einzubeziehen bzw. zu reduzieren, und dadurch mögliche künftige Ausfälle oder Störungen bei der Speicherbewirtschaftung zu verhindern.

## 7 Literaturverzeichnis

- [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. Abruřbar unter: <http://www.mzp.cz/>.
- [3] Národní akční plán adaptace na změnu klimatu - 1. aktualizace pro období 2021 - 2025. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2021. Abruřbar unter: <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.