

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



AKTUÁLNÍ RETENČNÍ KAPACITA SOUSTAVY MVN NA  
ŘÍČANSKÉM POTOCE  
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Václav Hradilek

Diplomant: Bc. Jakub Hrudka

2018

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Hrudka

Voda v krajině

Název práce

Aktuální retenční kapacita soustavy MVN na Říčanském potoce

Název anglicky

Actual storage capacity of SWR system on Říčanský brook.

---

Cíle práce

Zaměření hloubek a vytvoření DMT dna na soustavě nádrží ležících na Říčanském potoce. Data budou sbírána pomocí unikátní technologie, kterou disponuje KVHEM. Výsledky budou statisticky zhodnoceny a následně budou dle nejlepších statistických výsledků vygenerovány k jednotlivým nádržím jejich skutečné objemy zadržené vody. V případě dostupných historických dat budou tato data porovnána s daty naměřenými. Výsledkem bude popsání aktuální retence vody na soustavě MVN na Říčanském potoce.

Metodika

V teoretické části se bude student zabývat obecně tématem Batymetrie a schopností malých vodních nádrží zadržovat vodu v krajině. Bude zde kladen důraz na zahraniční literaturu a na nové vědecké poznatky z tohoto oboru.

V praktické části se student zaměří nejprve na sběr dat. Sběr dat bude provádět přístrojovým vybavením dostupným na KVHEM. Díky velkému objemu sbíraných dat a to především díky většímu počtu nádrží, bude tento úkol časově náročný. Dále bude potřeba zaměřit břehovou linii. Následně bude student pomocí programu ArcGIS data zpracovávat do podoby DMT, z kterých bude odhadovat aktuální retenční kapacitu soustavy.

Doporučený rozsah práce

40

Klíčová slova

Retence, batymetrie, echosounder, malé vodní nádrže

---

Doporučené zdroje informací

- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 199-214. Elsevier Science Publishers B.V.
- Colbo, K., Ross, T., Brown, C., & Weber, T. (2014). A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 145, 41-56. Academic Press.
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189. Elsevier Ltd. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815213003113>
- 

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Václav Hradilek

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 27. 11. 2017

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 11. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2018

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci nazvanou „Aktuální retenční kapacita soustavy MVN na Říčanském potoce“ vypracoval samostatně, pod vedením pana Ing. Václava Hradilka. Všechny použité materiály použité při vypracování diplomové práce jsou uvedeny v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Praze dne 16. 4. 2018

.....

## Poděkování

Rád bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Václavu Hradilkovi. Děkuji nejen za trpělivost, přínosné informace a čas při konzultacích, ale také za pomoc při měření dat. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi poskytli cenné rady při zpracování diplomové práce. Nakonec bych chtěl poděkovat celé své rodině a kamarádům za trpělivost a podporu během mého studia.

## Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na zjištění retenční kapacity soustavy malých vodních nádrží (MVN) na Říčanském potoce. Je zde zmíněna schopnost MVN zadržovat vodu v krajině a popsány metody batymetrického měření hloubek. Říčanská soustava MVN se skládá ze 13 nádrží. Na dvanácti MVN proběhlo batymetrické měření, přičemž na poslední MVN v současné době probíhá revitalizace, a tak měření chybí. K bodovému měření hloubek dna vodních nádrží byl použit unikátní způsob sběru batymetrických dat z echosounderu River Surveyor, který vlastní katedra *KVHEM na FŽP ČZU v Praze*. Pro získávání dat byl použit kajak, který je upraven na nesení přístroje RiverSurveyor M9, pomocí kterého byly měřeny hloubky nádrží. Naměřená data byla upravena v prostředí RiverSurveyor Live a Microsoft Excel, aby mohla být zpracována v programu ArcGIS. Pomocí předem zvolené interpolační techniky Universal Krigingu byly z bodového měření vytvořeny digitální modely terénu (DMT) dna jednotlivých nádrží. Z těchto DMT byly následně určeny aktuální retenční objemy MVN. Vypočtený celkový aktuální retenční objem soustavy MVN na Říčanském potoce je 591 241 m<sup>3</sup> na rozdíl oproti retenčnímu objemu dle manipulačních řádů (MŘ) 596 396 m<sup>3</sup>. Průměrná chyba RMSE pro celou soustavu je 0,201 m. Naměřená data byla porovnána s dostupnou dokumentací MŘ, přičemž korelují se stavem jednotlivých MVN. Nádrže nerevitalizované mají v některých případech pouze poloviční retenční kapacitu k  $H_{norm}$ .

## Klíčová slova

Retence, echosounder, malé vodní nádrže, Batymetrie

## Abstract

The thesis focuses on finding out the retention capacity of a network of small water reservoirs (SWRs) on the Říčany Brook. It mentions the ability of a SWR to retain water in the landscape and describes methods of bathymetric measuring depths. The Říčany SWR network comprises 13 reservoirs. The bathymetric measurement took place only in 12 SWRs for the last SWR is currently being revitalised. Point dataset of the bottom depths of the water reservoirs was carried out by means of a unique way of bathymetric data collection from the River Surveyor echo-sounder owned by *KVHEM FŽP ČZU v Praze* (Department of Water Resources and Environmental Modelling of the Faculty of Environmental Sciences at the Czech University of Life Sciences Prague). An adjusted kayak was used for the data collection, carrying RiverSurveyor M9 instruments by means of which the depths of the reservoirs were measured. The measured data was adjusted in RiverSurveyor Live and Microsoft Excel so it could be processed in ArcGIS program. Using prechosen Universal Kriging interpolation techniques, digital elevation models (DEM) of the bottoms of the particular reservoirs were made based on point dataset. Current retention volumes of the SWRs were subsequently assessed from the DEMs. The calculated total current retention volume of the SWRs network on the Říčany Brook is 591 241 m<sup>3</sup> unlike the retention volume of 596 396 m<sup>3</sup> presented by the handling regulations (HR). The average deviation (RMSE) for the whole network is 0.201 m. The measured data was compared with the available documentation of the HRs and it correlates with the state of the particular SWRs. In some cases, the non-revitalised reservoirs have only a half retention capacity to  $H_{norm}$ .

## Key words

Storage, echosounder, small water reservoirs, bathymetry

## Seznam použitých zkratek

MVN	Malá vodní nádrž
př. n. l.	před naším letopočtem
např.	například
apod.	a podobně
tj.	to jest
cca	přibližně
tzv.	takzvaně
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
m n. m.	metrů nad mořem
BLUP	Best linear unbiased prediction
DMT	Digitální model terénu
RMSE	Root Mean Square Error
GPS	Global Positioning System
IDW	Inverse distance weighting



# Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce .....	11
3	Literární rešerše .....	11
3.1	Malé vodní nádrže .....	11
3.1.1	Definice MVN .....	12
3.1.2	Historie MVN .....	12
3.1.3	Bezpečnostní přelivy .....	13
3.1.4	Sypané hráze .....	14
3.1.5	Schopností MVN zadržovat vodu v krajině.....	14
3.2	Batymetrie .....	16
3.2.1	Historie Batymetrie .....	16
3.2.2	Současné metody.....	17
3.2.3	Použitá metoda.....	20
3.3	Prostorová interpolace.....	23
3.3.1	Kriging.....	24
4	Charakteristika zájmového území .....	28
4.1	Panský rybník.....	31
4.2	Rozpakov .....	31
4.3	Marvánek.....	32
4.4	Mlýnský rybník.....	33
4.5	Návesní rybník.....	34
4.6	Vodice .....	35
4.7	Nadýmač II .....	36
4.8	Nadýmač I .....	37
4.9	Cukrovarský rybník.....	37
4.10	Podleský rybník .....	38
4.11	Retenční nádrž Říčanka .....	39
4.12	V Rohožníku.....	40
5	Metodika.....	41
5.1	Měřicí aparatura .....	41
5.2	Princip použité metody měření .....	43
5.3	Zpracování naměřených dat .....	44
6	Výsledky .....	45
7	Diskuze.....	60
8	Závěr .....	61
9	Literatura a použité zdroje .....	63

10	Seznam obrázků .....	67
11	Seznam tabulek .....	68
12	Seznam rovnic .....	69
13	Přílohy.....	69

# 1 Úvod

Změny probíhající v několika posledních letech v hydrologickém režimu vodních toků ve světě i na území České republiky jsou do určité míry důsledkem v dnešní době často zmiňovanou klimatickou změnou. Hydrologické extrémy představují v současné době projevy, které i v podmínkách střední Evropy nabývají velmi významně na intenzitě. Výskyt hydrologických extrémů, jako jsou povodňové události nebo extrémně suchá období, je zásadní detailně analyzovat, pro porozumění a objasnění procesu odtoku v konkrétních podmínkách jednotlivých povodí. Stále častěji se vyskytující přívalové povodně a extrémně suchá období mají za následek naléhavou potřebu řešení velkého komplexu otázek ochrany proti hydrologickým extrémům. Do popředí zájmu společnosti se začínávají dostávat nová opatření zaměřená na postupné zvyšování retenční kapacity povodí. Malé vodní nádrže, akumulární a retenční nádrže patří mezi jednu z možností vhodných opatření při řešení této komplexní problematiky.

V rámci opatření typu MVN je hlavním pozitivem z pohledu zlepšení retence vody v povodí akumulace vody a její možné využití v období sucha. MVN jsou velmi diskutovaná opatření. Podle výsledků ze srážko-odtokových modelů lze konstatovat, že dokáží zadržet poměrně velké množství vody v povodí a následně nadlepšovat průtoky v suchém období což může mít pozitivní vliv na vodní toky pod nimi až několik dní. Vše však závisí na typu a ovladatelnosti spodních výpustí, zvoleném způsobu manipulace a manipulačním řádu. Často bývá v projektech nádrží uváděno, že nádrž bude v suchých obdobích sloužit k nadlepšování průtoků, po realizaci k tomu však nedochází (zejména u rybochovných či rekreačních nádrží, kde naopak v suchých obdobích téměř veškerou vodu zadržují a vypouští se pouze nezbytné stanovené minimum). Tuto problematiku by mohla alespoň částečně vyřešit například vhodná změna legislativy a zejména její důsledné dodržování (VTEI, n.d.).

Hlavní vodohospodářský problém malých vodních nádrží tvoří jejich zanášení sedimenty. Zanášení nádržních prostorů sedimenty je způsobováno erozními procesy, vznikajícími zejména na zemědělské půdě v povodí nádrže. Při snížení průtočné rychlosti v nádržích dochází k sedimentaci půdních částic v prostoru nádrže s řadou negativních dopadů na nádrž a kvalitu vody jak v nádrži, tak i v toku pod hrází. Jeden z hlavních negativních dopadů je zmenšení objemu nádrže, který vede ke změnám v její hydraulické funkci a snižování provozuschopnosti funkčních objektů zanášením sedimentem (Vrána a Beran 2013).

Diplomová práce je zaměřena na bodové batymetrické zaměření vodních nádrží na soustavě Říčanského potoka a následné zjištění její aktuální retenční kapacity. Pro batymetrické měření je možné využít několik přístrojů a metod. V našem případě byla zvolena akustická metoda a přístroj RiverSurveyor M9, který funguje na principu ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Přístroj se používá k měření rychlosti proudění vody, je však možné ho použít i k měření hloubek, tedy batymetrie.

## 2 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je batymetrické zaměření vodních nádrží, které se nacházejí na soustavě Říčanského potoka, vyhodnocení naměřených dat a vytvoření digitálních modelů terénu dna jednotlivých nádrží. Z digitálních modelů byla určena aktuální retenční kapacita MVN na Říčanském potoce.

V literární rešerši je definován pojem malé vodní nádrže a popsána jejich historie. Dále jsou zde rozděleny bezpečnostní přelivy a popsána schopnost malých vodních nádrží zadržovat vodu v krajině. V další části rešerše je popsán pojem batymetrie, její historie, současné metody a použitá metoda při měření na Říčanské soustavě MVN. V metodice je uveden popis měření v praxi a následné zpracování dat v programu ArcGis. Je zde uvedena interpolační metoda Kriging, která byla použita při DMT dna. V rámci práce je popsána oblast Říčanské soustavy a jednotlivé vodní nádrže. Měřená data jsou vyhodnocena, prezentována a diskutována.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Malé vodní nádrže

MVN jsou nedílnou součástí naší krajiny a plní mnoho důležitých a nezastupitelných funkcí. Při správném návrhu, kvalitní výstavbě a odpovědném provozování tyto nádrže významně přispívají k ochraně a tvorbě našeho životního prostředí (ŠÁLEK 1996). Vodní nádrž je definovaná jako prostor, v němž je možno nadržet vodu pro pozdější využití nebo zachytit přívalovou povodňovou vlnu, aby nenapáchala škody dále po toku. Mezi účely využití MVN patří vzduť vody pro splavnost toku, ochrana před povodněmi, zásobárna pitné vody, výroba elektřiny, chov ryb a rekreace. Obecně se MVN dostává méně pozornosti než těm velkým ať už z pohledu hydrologického výzkumu nebo řízení a sledování (Fowe et al., 2015). Vodní nádrže se dělí na přirozené a umělé. Přirozené nádrže vznikají bez činnosti člověka např. jezera vytvořená trvalým zahrazením údolí přirozeným způsobem (skalním zřícením, sesuvem půdy) apod. Umělé nádrže jsou nádrže uměle

vybudované, jako např. rybníky, malé nádrže nebo přehrady. Vodu v těchto umělých nádržích lze ovládat, tj. nádrž se může vypouštět i napouštět, a dá se regulovat výše hladiny (Pavlica 1964).

### 3.1.1 Definice MVN

Pojem malé vodní nádrže vymezuje ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže jako vodní nádrže, u nichž jsou splněny tyto podmínky:

- Objem nádrže po hladinu ovladatelného prostoru (normální hladinu) není větší než 2 mil. m<sup>3</sup>.
- Největší hloubka nádrže nepřesahuje 9 m (rozumí se největší hloubka dna od maximální hladiny, přičemž se neberou v úvahu místní prolákliny dna, hloubka koryta napájecího toku apod.)

Normální hladinou (hladinou normálního nadržení) je nejvyšší hladina ovladatelného prostoru nádrže, vymezena korunou nehrazeného přelivu nebo horní hranou uzávěrů hrazeného přelivu.

Norma se doporučuje i pro rekonstrukci stávajících, zejména historických nádrží, jejichž parametry přesahují uvedené podmínky. Norma se nevztahuje pro odkaliště. Pro nádrže s celkovým objemem menším než 5 tis. m<sup>3</sup> je možno některé zásady, uvedené v normě, upravit místním podmínkám (Vrána a Beran 2013).

### 3.1.2 Historie MVN

Je známo, že vývoj lidské společnosti závisel z velké části na dostatku či nedostatku vody a že celá historie lidstva na zemi je těsně spojena s vodou. Již dávno objevené historické záznamy z různých míst na světě dokazují, že budování vodních nádrží, určených k akumulaci vody pro období jejího nedostatku, a to zejména za účelem závlah zemědělských plodin, se zabývali lidé v oblastech těch nejstarších známých civilizací – v Egyptě, v Mezopotámii, v Číně i v Indii. Lidé stavějí nádrže po tisíce let. V Egyptě jižně od Káhiry je zachováno těleso hráze datované 5000 let př. n. l. vytvářející velkou vodní nádrž. Nejstarší známou přehradou na světě je Jawaská přehrada v Jordánsku. Byla postavena kolem roku 3000 př. n. l., aby zadržovala vodu na zavlažování plodin (Encyclopaedia Britannica 1998). Na našem území existuje první písemná zmínka o rybnících z roku 1115, a to v tzv. listině Kladrubské. V polovině 14. století byla technika stavby nádrží již natolik osvojena a rozvinuta, že byly budovány už docela vysoké hráze v širokých údolích toků. Za vlády Karla IV. došlo k dalšímu rozvoji rybníkářství. Byl založen mj. tzv. Velký rybník u Doks, dnes

známý pod jménem Máchovo jezero. Pro nové rybníky byly využívány hlavně stávající močály a blata, přispívalo se tak i k ozdravení krajiny a nové hráze se stávaly základem pro tvorbu nové cestní sítě. Období počátku 17. století je označováno jako období největšího rozkvětu rybníkářství v Čechách a na Moravě, na jehož konci zde prý existovalo až 75 000 rybníků. Další staletí však přinášela stagnaci a rušení rybníků kvůli pozemkům pro pěstování zemědělských plodin. Lehké oživení nastává v 2. polovině 19. století, kdy vyřešením některých základních otázek bylo rybníkářství postaveno na vědecký základ a bylo postaveno na úroveň ostatním zemědělským odvětvím. Přesný počet malých vodních nádrží, akumulovaný objem vody ani rozloha nádrží v České republice nejsou známy. V Generelu rybníků a nádrží České republiky jsou k roku 1995 uvedeny tyto informace na základě evidence Vodní díla – TBD a.s., a to počtem 20 až 22 tisíc nádrží o rozloze něco málo přes 500 km<sup>2</sup> a objemu zadržené vody přibližně 420 mil. m<sup>3</sup> (Vrána a Beran 2013).

### 3.1.3 Bezpečnostní přelivy

Bezpečnostní přelivy slouží k ochraně nádrží před účinky povodňových průtoků (Liu et al., 2017),(Sordo-Ward et al., 2013). Bezpečnostní přelivy je nutno navrhovat na všech průtočných nádržích, na nádržích neprůtočných je možné navrhovat kapacitu přelivu sníženou na maximální hodnotu, která může do nádrže náпустným zařízením maximálně přitéci. Přelivy malých vodních nádrží mají být nehrazené, nevyžadují obsluhu při průchodu povodňové vlny. Hrazeného přelivu smí být použito ve zdůvodněných případech u nádrží se stálou obsluhou (Bagis and Karaboga, 2007). Bezpečnostní přelivy tedy chrání vlastní nádrž, zejména hráz před přelitím, poškozením a údolí pod nádrží před možnými škodami, vzniklými přelitím nebo protržením hráze. Přelivy se navrhují na provedení návrhového kulminačního průtoku, který je pro MVN dán nejvyšší hodnotou  $Q_{100}$ . U menších historických nádrží je možné volit návrhový průtok menší, tj.  $Q_{50}$ . Při snížení návrhového průtoku je nutné zohlednit místní podmínky, zejména z pohledu možných škod v údolí pod nádrží při přelití koruny hráze.

Na bezpečnostním přelivu ani v jeho bezprostřední blízkosti nesmějí být umístěna žádná zařízení, ohrožující jeho funkci a snižující jeho kapacitu. Je-li nutné umístit před přeliv česle, mají se umístit mimo dosah snížení hladiny při přepadu přes přelivnou hranu. Jejich horní hrana nesmí sahat nad maximální hladinu vody v nádrži. Výpočtem je nutné prokázat, že ani při jejich úplném ucpání a průtoku rovném návrhovému kulminačnímu průtoku nedojde k ohrožení bezpečné funkce nádrže (Šedivý a Vrána 2011).

Typy bezpečnostních přelivů:

- Přímé přelivy
- Boční přelivy
- Kašnové přelivy
- Šachtové přelivy
- Kombinované přelivy

#### 3.1.4 Sypané hráze

Konstrukce hráze je závislá na půdně mechanických vlastnostech použitých zemin, podloží hráze a objektech v hrázi. Úroveň koruny hráze se stanoví podle nejvyšší hladiny při průchodu návrhové povodně a bezpečnostního převýšení. Podle půdorysného uspořádání se hráze rozdělují jako přímé, lomené a zaoblené. Ve vztahu k vodní ploše známe hráze čelní, boční nebo dělicí. Boční hráze oddělují nádrž od vodního toku a vytvářejí nádrž neprůtočnou. Boční hráze, které jsou po celém obvodu rybníka se nazývají obvodové, nádrž je zahloubená. Dělicí hráze rozdělují velké nádrže na menší většinou z hospodářských důvodů. Podle přítoku vody do nádrže je dělíme na průtočné, s obtokem a boční. V otevřených údolích se navrhují většinou boční nádrže.

Typ hrází se volí buď homogenní nebo nehomogenní (zonální). Homogenní hráz je vhodná do výšky 6 m a v případě, že v hospodárné vzdálenosti je dostatek vhodného materiálu. Homogenní hráze se budují ze zeminy, která současně plní stabilizační a těsnící funkci. Při trvalém zatížení vodou je vybavena opevněním svahů a drenážní soustavou a při propustné základové půdě i těsnícím prvkem podloží. Sypaná hráz s těsnícím prvkem je nejpoužívanější typ hráze a může mít rozmanité uspořádání, zejména s ohledem na použitý typ těsnění. Těsnící zemní prvek je možno koncipovat jako šikmý nebo svislý (těsnící jádro) (Šedivý a Vrána 2011).

#### 3.1.5 Schopností MVN zadržovat vodu v krajině

U malých vodních nádrží je hlavním pozitivem z pohledu zlepšení retence vody v povodí akumulace vody a její možné využití v období sucha. Nádrže se rozdělují podle způsobu zásobení vodou. Zdrojem může být vodní tok, pramen nebo dešťová voda (nebeské nádrže). Říční a potoční nádrže jsou dotovány vodou z potoků a řek. MVN jsou budovány k různým účelům: ochranné retenční nádrže, rybochovné nádrže čili rybníky, nádrže na ochranu flory a fauny, rekreační nádrže, hospodářské a další. Výstavbou nebo revitalizací stávajících nádrží lze, krom stanovenému účelu, docílit řady dalších příznivých efektů v krajině. V první řadě dojde

vždy ke zvýšení zásoby vody v krajině s pozitivním dopadem na lokální zásoby podzemních vod (Azis et al., 2015),(Li et al., 2017). Nádrže také příznivě ovlivňují průběh velkých vod, kdy dochází k transformaci povodňové vlny. Schopnost nádrže transformovat povodňové průtoky je úměrný především velikosti ovladatelného retenčního prostoru (prostor mezi kótou normální hladiny a hranou bezpečnostního přelivu). S velikostí retenčního prostoru se zvětšuje objem zadržené vody při povodni a časové zpoždění odtoku povodňové vlny. Jestliže není vodní nádrž intenzivně využívána (např. k chovu ryb), může být přínosem pro zlepšení kvality protékající vody. Ochranou funkci před nadměrným zanášením nádrží splaveninami může plnit předsazená sedimentační nádrž. Současný stav malých vodních nádrží v ČR je velice neuspokojivý. Jejich vzhled a fungování odpovídá stáří, nedostatečné péči a finančním prostředkům vynaložených na jejich údržbu. Hlavním a největším problémem je zanášení nádrže sedimenty. Tento přirozený jev způsobuje zvýšení dna a zmenšení akumulačního prostoru (Khaba and Griffiths, 2017). Mezi důvody zanášení patří hlavně břehová abraze, vnitřní zanášení a zanášením přítokem. U průtočných nádrží se jedná hlavně o zanášení vodním tokem. Důvodem je eroze na zemědělských a lesních pozemcích. S nadměrným usazováním sedimentů souvisí jejich odstranění – tzv. odbahnění nádrže. Tato záležitost je časově i finančně velice nákladná. Jedna z možností zamezit zanášení nádrže, je zajistit komplexní protierozní ochranu v rámci povodí (De Vincenzo et al., 2017). Kromě výše uvedených funkcí plní nádrže také biologickou funkci. Stávají se biotopem vodních a mokřadních druhů rostlin a živočichů (Blicharska et al., 2016). Každá vodní nádrž se stává významným krajinným prvkem, a to zejména schopností zadržovat vodu v krajině. Vodu v krajině nezadržují jen MVN, tůně, mokřady, či revitalizovaná koryta potoků. Velice důležitý je také vegetační pokryv, jako jsou travní pásy, průlehy, zakládání a obnova mezí, alejí a remízků. Přirozené zadržování vody v krajině je nejlepší ochrana před suchem i povodněmi (Ehsani et al., 2017). Problémy se suchem a přívalovými dešti, které způsobují povodně, se stávají pro ČR stále aktuálnější. Předpokládá se, že v příštích letech bude četnost a délka suchých období ještě narůstat (Stagge et al., 2015),(Hao et al., 2017). S vyššími teplotami bude ovšem narůstat také bouřková činnost. Bouřky meteorologové zaznamenávají dokonce už i v zimě (Munzar and Franc, 2003). Voda, která by měla zůstat v krajině, naopak odplavuje úrodnou půdu. Je proto nejvyšší čas začít budovat opatření, která by dokázala vodu v krajině udržet a chránit půdu před erozí. V rámci opatření typu malých vodních nádrží je hlavním pozitivem z pohledu zlepšení retence vody v povodí akumulace vody a její možné využití v období sucha (Fowe et al., 2015). S ohledem na funkce MVN, z nichž mnohé sice vodu akumulují, ale není možné ji v suchých obdobích využívat (např. z důvodu výskytu rybí obsádky),



Ize za nejvhodnější označit retenční nádrže suché a s malým stálým nadržáním. MVN jsou velmi diskutovaná opatření. Podle výsledků ze srážko-odtokových modelů lze konstatovat, že dokáží zadržet poměrně velké množství vody v povodí a následné nadlepšování průtoků v suchém období může mít pozitivní vliv na vodní toky pod nimi až několik dní. Vše však závisí na typu a ovladatelnosti spodních výpustí, zvoleném způsobu manipulace a manipulačním řádu (VTEI, n.d.).

## 3.2 Batymetrie

Batymetrie je měření hloubky vody v oceánech, řekách nebo jezerech. Batymetrická mapa vypadá hodně podobně jako topografické mapy, které používají čáry pro zobrazení tvaru a výšky povrchu země. Na topografických mapách spojují linie body se stejnou nadmořskou výškou. Na batymetrických mapách spojují body stejné hloubky. Batymetrie je základem vědy o hydrografii, která měří fyzikální vlastnosti vodního útvaru (NOAA). Jeden z významů batymetrie je to, že definuje životní prostředí fauny a flóry oceánů, moří a jezer. Pokud jde o změnu klimatu, batymetrie upozorňuje svět na důsledky změny klimatu. Například varuje vědce o nárůstu hladiny moře a potenciální erozi pobřeží. Kromě toho se batymetrické údaje používají při rybolovu a určení námořních hranic. To také umožňuje vědcům identifikovat geologické nebezpečí jako podvodní sesuvy půdy. Batymetrické údaje jsou využívány k vytváření hydrodynamických modelů. Očekává se, že budou existovat inovace sofistikovanějšího vybavení, které umožní přesnější pohled na terén pod hladinou. Znalosti budou rozhodující pro nalezení řešení problému, jako jsou tornáda, hurikány a stoupající hladina moří. Kromě toho se batymetrie bude vyvíjet kvůli změnám v životním prostředí (Worldatlas.com).

### 3.2.1 Historie Batymetrie

Batymetrie je používaná déle, než byste si mysleli. První technika batymetrie začala ve starověku a byla používána až do 70. let 20. století. Tato metoda spočívala v potopení zatíženého lana do vody ze strany lodi. Hloubka moře byla určena měřením délky lana potřebné k dosažení mořské dno. Tato základní metoda byla užitečná, protože se dalo změřit, jak hluboká voda byla v konkrétním místě, takže lodě by neuvízly na mělčině. Tato metoda měla mnoho nedostatků, protože nezohledňovalo proudy ve vodě, které by mohly táhnout lano nebo pohyb lodi. I za vhodných podmínek mohla tato metoda určit hloubku pouze jednoho konkrétního místa na mořském dně. V 19. století začali lidé zkoumat a zaznamenávat hlubiny oceánu pro vědecké objevy a obchodní zájmy. V roce 1840 britský vědec Sir James Clark Ross využil metodu ponoření zatíženého konopného lana a vytvořil první

batymetrickou mapu Mexického zálivu. Zatímco mapa nebyla příliš přesná, ukázala rysy Mexického zálivu, které byly předtím neznámé (Mayer 2016). S vývojem moderní techniky pro batymetrická měření se začala využívat akustická a vizuální technologie. S rozvojem letecké fotografie a sonarové techniky bylo možné batymetrické mapování větších jezer. Od roku 1990 došlo k významnému zlepšení přesnosti technik mapování batymetrie, využíváním geografických informačních systémů (GIS) a systémů GPS (Global Positioning Systems - GPS) (Wilke 2007).

### 3.2.2 Současné metody

#### 3.2.2.1 Optické metody

Techniky zpracování obrazu, které zahrnují multispektrální dálkově zaznamenaná data, jsou považovány za velmi atraktivní pro využití v batymetrii, neboť poskytují časově úsporné a efektivní řešení odhadu hloubky vody (Pattanaik et al., 2015). Pro použití v batymetrii se dají optické metody rozdělit na pasivní, které měří pouze přirozené světlo odrážející se ode dna, a aktivní, které využívají lasery k měření vzdálenosti na dno.

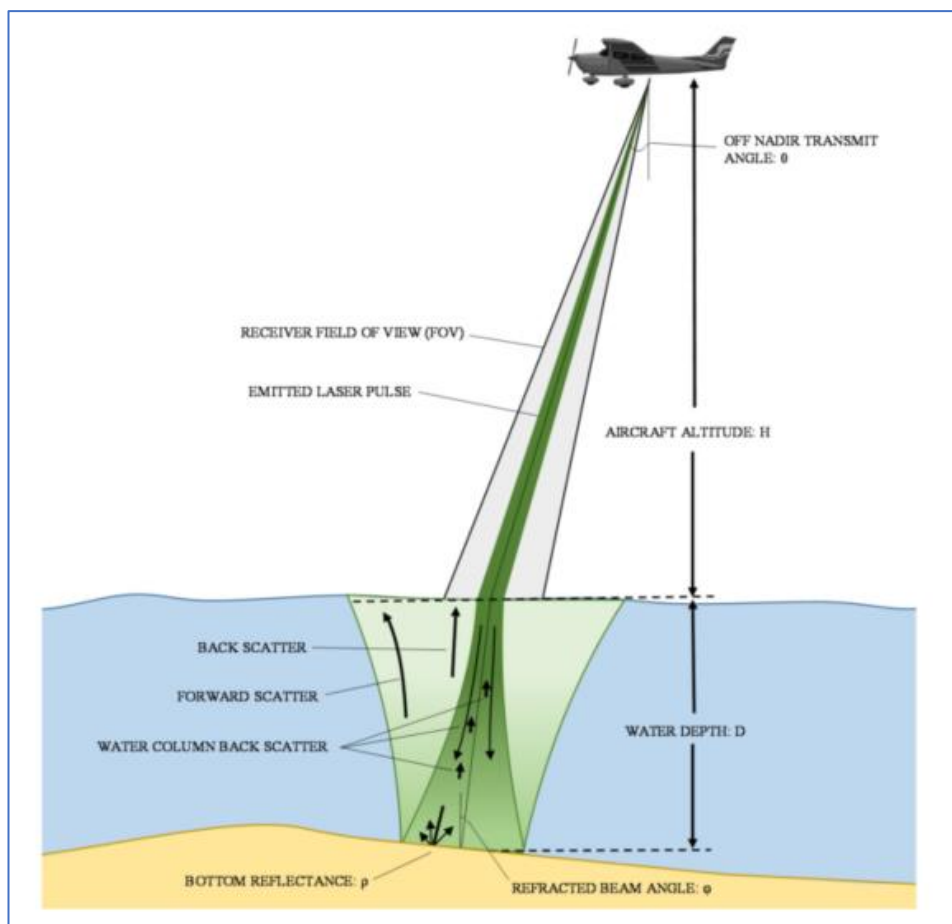
Pasivní metoda (passive ocean color remote sensing) vychází z odrazu slunečního světla. Velice malé procento slunečního světla, které dopadá na vodní hladinu je odraženo a rozptýleno zpět. Odražené světlo může být vzdáleně detekováno letadly nebo družicemi. Pasivní barevné senzory měří toto malé množství slunečního záření, které vstoupilo do vodního sloupce a bylo rozptýleno zpět (Dierssen, 2010). Ve vodě, která je dostatečně mělká a dostatečně jasná, aby se světlo dostalo až na dno (nazývané „opticky mělké“), hraje svoji úlohu i barva dna, která přispívá k množství odraženého záření a tím pomáhá určit tvar dna. V nejčistších přírodních vodách mohou být detekována jasná písčité dna ve vzdálenosti 30 m a více. V mnoha oblastech je snížena čistota vody řasami, sedimenty a jinými barevnými látkami, takže zde mohou být měřeny hloubky obecně menší než 10 m. Vzhledem k tomu, že je voda zakalená sedimenty nebo fytoplanktonem, většina světla vstupujícího do vodního sloupce je absorbována v horní vrstvě a voda se stává „opticky hluboká“ jen několik málo metrů pod hladinou. V patřičně mělké a čisté vodě lze rozsah a spektrální kvalitu, která je závislá na dně interpretovat pomocí snímačů. Metody pro získání tvaru dna z pasivních měření jsou buď empirické nebo radiometrické, založené na iteračním modelování nebo podle tabulek. Většina empirických metod využívá vysoce červené záření nebo vlnové délky v blízkosti infračerveného záření, z důvodu absorpce záření vodou, tudíž je signál méně ovlivněn fytoplanktonem, sedimenty a jiným materiálem (Dierssen et al., 2003).

Radiometrické metody jsou obecně založeny na využívání viditelného spektra a vyžadují mnoho vlnových délek k určení batymetrie. Navíc také řeší barvu dna (tzv. Benthonovou reflexi), protože to je klíčovou složkou záření, kterou voda vyzařuje. Použití družic pro získání batymetrie mělkých vody je poměrně efektivní a méně finančně náročné než akustické metody. Nicméně mezi problémy této metody patří oblačnost, takže lze analyzovat snímky pouze, když je jasná obloha. Kromě toho je pouze jen několik procent dopadajícího světla na vodu odraženo zpět na satelit. Při dálkovém průzkumu je další problém, že záření prostupuje atmosférou, která obsahuje plyny a aerosoly, které taky odrážejí záření zpět do senzorů. Samotná atmosféra odráží více fotonů než vodní plochy. Tudíž musí docházet k atmosférickým korekcím, které vedou k získání přesného množství odraženého záření. Pokud je atmosférickou korekcí odstraněno příliš mnoho signálu, zdá se, že je oceán příliš tmavý a dochází ke zkreslení batymetrie, a to platí i naopak (Dierssen and Theberge, 2016a).

Aktivní metodu dálkového průzkumu zastupuje LiDAR („Light Detection And Ranging“) což je aktivní systém, který měří topografii a fyzikální charakteristiky mořského dna pomocí pulsního nebo laserového světla. Vratné impulzy mohou být analyzovány tak, aby poskytovaly prostorově kontinuální batymetrická data s vysokým rozlišením (Costa et al., 2009). Batymetrický Lidar je letecká měřicí technologie. Na rozdíl od vzdušného topografického Lidaru, který pro měření využívá infračervenou vlnu délku 1 064 nm, batymetrické systémy Lidar používají zelenou vlnovou délku 532 nm, pro průnik vodního sloupce a měření mořského dna. Senzory lze zjednodušit do čtyř hlavních komponentů:

- přijímač GPS, který udává pozici letadla
- inerciální měřicí jednotka (IMU), která udává natočení, rotaci a směr letadla
- laserový snímač, který vysílá signál v určitém vzoru
- snímač, který detekuje zpětný signál

Určení polohy a orientace všech těchto komponentů je zásadní pro přesné měření systémem Lidar. Některé z těchto senzorů mohou v současné době měřit více než 100 000 bodů za sekundu, což vede k průzkumům s více jak 10 body na m<sup>2</sup> v mělké vodě (Quadros, 2017). V ideálních podmínkách byla pomocí Lidaru měřena hloubka až 60 m, ale při měření v běžných podmínkách je hloubka omezena na <40 m (Pittman et al., 2013). Aktuální měření Lidaru s přesností 10-30 cm může zajistit bodové měření od 0,1 do 8 pixelů na m<sup>2</sup>. Na rozdíl od akustických snímačů na lodích je snímání zajištěno v páscech s pevnou šířkou, nezávisle na hloubce vody a celková



Obrázek 1: Metoda dálkového průzkumu LiDAR (Kashani et al., 2015)

plocha pokrytí může dosahovat až  $70 \text{ km}^2$ . Další významnou výhodou Lidaru je, že může mapovat půdu a vodu ve stejnou chvíli a zajistit tak kontinuitu mapování vodní plochy a okolního terénu (pobřeží). Systémy Lidar jsou často spojeny s pasivními hyperspektrálními zobrazovacími jednotkami, které dokáží současně posoudit jak batymetrii, tak i složení mořského dna (Dumke et al., 2018).

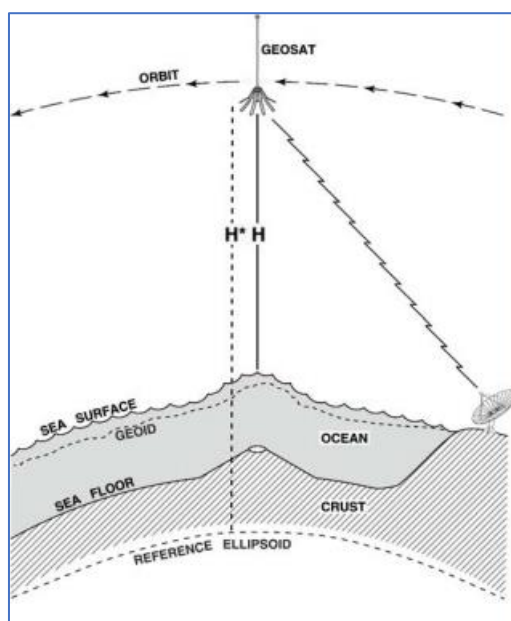
### 3.2.2.2 Radarové metody

Jedná se o satelitní měření výšek. Radary mohou být umístěny na satelitu k detekci rozsáhlých změn v batymetrii, které souvisejí s výškou moře. Z radarových senzorů jde odvodit batymetrie oceánů a moří pomocí teorie vln. Přítomnost batymetrických rysů, jako jsou hřebeny a prohlubně, vytváří změny v zemském gravitačním poli, které způsobují malé výkyvy ve výšce hladiny moří (gravitační anomálie). Hladina moře je v důsledku reakce na topografii dna mírně vyboulená. Satelitní radarové výškoměry, které obíhají Zemi, mohou měřit tyto nepatrné odchylky mořské hladiny, vysláním radiových vlnových impulzů při vysokých frekvencích, obvykle v rozmezí kolem  $13 \text{ GHz}$ , pro určení změny výšky mořské hladiny. Radarový signál se odrazí od hladiny moře a měří se čas, za který se signál vrátí zpět do senzoru. Pokud je pozice satelitu na oběžné dráze správně určena, pak čas odrazu

signálu může být přesně vztažen k výšce mořské hladiny vzhledem k družicovému senzoru a může se odhadnout s přesností na několik centimetrů. U vlnových délek od 1 do 200 km jsou odchylky gravitační anomálie vysoce korelovány s mořskou flórou a používány ke gravimetrickému mapování batymetrie světových oceánů s prostorovým rozlišením  $\sim 10$  km. Aby bylo možné vytvořit věrohodné odhady batymetrie, tak jsou gravimetrická anomální měření kombinována s akusticky stanovenými sondami pro konstrukci jednotných sítí topografií mořského dna (Smith and Sandwell, 2004). Komplexní batymetrická síť s vysokým rozlišením byla konstruována z kvalitně kontrolovaných vrstev, které vznikly pomocí interpolace mezi zvukovými body a gravitačními daty odvozenými z družic. Tato data jsou volně dostupná a jsou využívány v aplikacích pro předpovědi směru tsunami a modelech oceánských proudů. Datové sady však nejsou dostatečně přesné v mělkých vodách, kde by jiné metody dálkového průzkumu, jako je Lidar, mohly dosáhnout výrazně lepší přesnosti (Amante and Eakins 2009).

### 3.2.3 Použitá metoda

#### 3.2.3.1 Akustická metoda



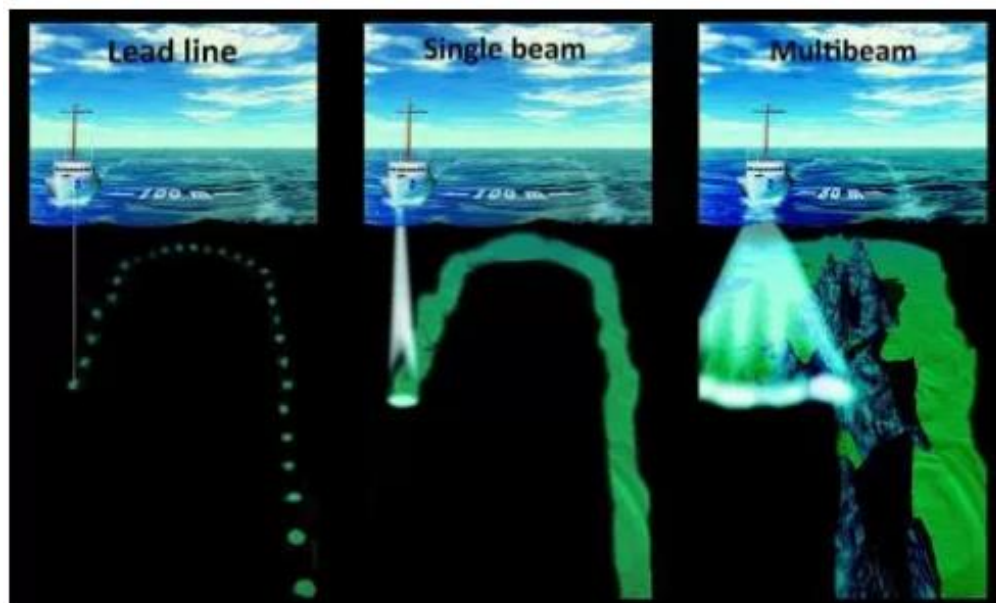
Obrázek 2: Radarová metoda měření batymetrie (Smith and Sandwell, 2004)

Akustická Batymetrie se objevila ve dvacátých letech dvacátého století a pomohla při určování tvaru mořské dna, jak ho známe dnes (Dierssen and Theberge, 2016b). V začátcích byla používána technika vypouštění jediného zvukového pulzu a měření uplynulého času od vypuštění, následného odrazu ode dna a návratem pulzu do hydrofonu umístěného na lodi. Polovina změřeného času byla vynásobena

rychlostí zvuku ve vodě a tím byla vypočtena hloubka dna v konkrétním místě. Zvuk se ve vodě dokáže pohybovat na větší vzdálenost a s menším utlumením než ve vzduchu, to konstatoval Leonardo da Vinci v roce 1490 a následně Benjamin Franklin v roce 1762 (Theberg 2010). Další vlastností zvuku je také to, že se ve vodě pohybuje rychleji než ve vzduchu a tím pádem je možné změřit i velké hloubky bez podstatného zhoršení signálu. Rychlost zvuku v mořské vodě je ~ 1500 m/s, ale přesná rychlost závisí na teplotě vody, slanosti a tlaku v určité hloubce vodního hloubce. Kromě rychlosti zvuku může ovlivnit přesnost měřené hloubky i charakter dna, vegetační pokryv, biota a další částice ve vodním sloupci.

Dnes se pro měření batymetrie s vysokým rozlišením využívají multibeam („mnohopaprskčité“) sonary. Jakýkoli pulz tohoto sonaru obsáhne široký pás zvukových vln (až 153°), které odrazí povrch dna. Zpětná ozvěna je přijímána řadou snímačů a následně elektronicky oddělena do množství jednotlivých paprsků. Pro každý z nich se vypočte hloubka. Velké přesnosti rozlišení je dosaženo v mělkých vodách, ale je snížena šířka rozsahu sonaru. Naopak efektivnost měření se zvyšuje v hlubokých vodách, kde se rozsah sonaru geometricky rozšiřuje, ale přesnost rozlišení klesá. Loď se pohybuje v na sebe navazujících pásích a zaznamenává měřené hloubky. Ze série překrývajících pásů se vytváří batymetrická mapa pozorované oblasti. Pro různé hloubky jsou využívány rozličné zvukové frekvence (např. 12-400 kHz). Nižší frekvence jsou využívány pro větší hloubku, zatímco vyšší frekvence je spojena s vyšším rozlišením, ale menší hloubkou. Batymetrie se dá v dnešní době měřit s vyšším rozlišením a přesností, které byly dříve nedosažitelné. Základní nevýhody akustických měření je čas a náklady spojené s lodí při měření. Aby bylo možné vytvářet souvislé obrazy dna ve vysokém rozlišení, musí být pořízeno mnoho překrývajících se linií měření. Obecně lze akustické metody použít pro měření

v oceánech, řekách nebo jezerech. Avšak akustické metody nejsou ideální pro měření větších území (Dierssen and Theberge, 2016a).



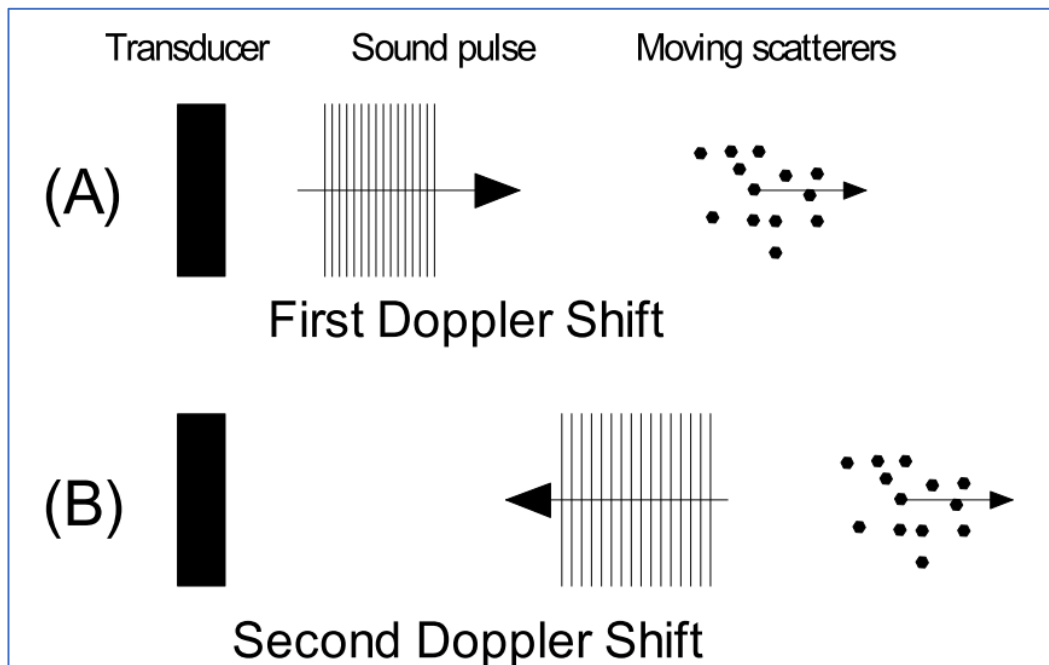
Obrázek 3: Porovnání pokrytí dna dosažené různými metodami průzkumu (Dierssen and Theberge, 2016a)

### 3.2.3.2 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Acoustic Doppler current profiler je přístroj k měření rychlosti vody v celém vodním sloupci, je však možné ho použít i k měření hloubek. Jestliže je přístroj umístěn na mořském dně, dokáže měřit rychlosti v pravidelných vzdálenostech až k vodní hladině. Měřící zařízení může být instalováno vodorovně např. na mostních pilířích ve vodním toku nebo na plavidle pohybujícím se v příčném směru, které slouží pro zjištění profilu dna. Zařízení může být nainstalováno na spodní části trupu plavidla, kde měří rychlost proudění (Novák et al., 2017).

Princip fungování metody ADCP je v použití zvuku. Pomocí zvukových vln se měří rychlost proudění vody na základě Dopplerova jevu. Zvuk má vyšší frekvenci, když se přibližuje, než když se vzdaluje. ADCP funguje tak, že vysílá krátké sekvence zvuku do vody při konstantní frekvenci. Zvukové sekvence mají tak vysoký tón, že je člověk není schopen vnímat. Jak zvukové vlny cestují prostorem, tak se odráží od rozptýlených částíček v pohybující se vodě a vrací se zpět k zařízení. Dopplerův jev způsobuje, že zvukové vlny odražené zpět od pohybující se částice dál od zařízení mají mírně sníženou frekvenci, když se vrací. Částice pohybující se směrem k zařízení vrací zpět vlny o vyšší frekvenci. Rozdíl ve frekvenci mezi vlnami vyslanými a přijatými se nazývá Dopplerův posun. Přístroj používá tento posun k výpočtu rychlosti pohybující se částice ve vodním sloupci čili rychlosti proudění. (Shields and

Rigby, 2005). Při měření hloubek nejde tolik o frekvenční posun, ale o čas, za který zvukový signál doputuje na dno, odrazí se a je zaznamenán na zařízení. Z teploty vody, která je měřena na zařízení se určí upravená rychlost proudění ve vodním prostředí a podle toho se dopočítává vzdálenost, tedy hloubka v daném bodě.



Obrázek 4: Dopplerův posun, (A) směrem k částicím, (B) po odrazu směrem zpět (Teledyne and Gordon, 2011)

Výhodou systému je, že dokáže měřit i malé proudění. Rozdíl od předchozích technologií je hlavně ten, že ADCP měří absolutní rychlost vody v reálném čase, a ne jenom jak rychle se pohybuje jedna vodní hmota ve vztahu k jiné. Nevýhody této technologie jsou např. ve vysoké frekvenci vysílaného zvuku, která sice poskytuje vysokou přesnost dat, ale neproniká do větších hloubek. Pokud je voda velmi čistá může nastat problém, že se ve vodě nenachází dostatečné množství částic, aby poskytli spolehlivé údaje. Další překážkou jsou bubliny v turbulentní vodě, které způsobují nepřesnosti měření, především v oblasti hladiny (WHOI, 2018).

### 3.3 Prostorová interpolace

V oborech pracujících s prostorovými veličinami se setkáváme s úlohou, kdy máme změřená data v nepravidelné síti bodů a zajímá nás průběh veličiny mezi nimi, v celé oblasti. Datová síť většinou není dostatečně hustá, dat je málo, a je nemožné zjistit průběh prostorové veličiny přesně. Spíše, nežli detaily může být proto rozumné hledat nějakou reprezentativní plochu, jakýsi prostorový průměr závislý na souřadnicích. Zpravidla se pomocí nějaké interpolační metody dopočtou hodnoty v hustší pravidelné pravoúhlé síti, které se pak buď přímo zobrazí v rastrové grafice



či prostorové projekci nebo se jimi proloží izolinie. Interpolačních metod, které k tomu lze použít, je spousta. Jsou založeny na prokládání vhodných funkcí nebo vážených průměrech (Ježek, 2015). Velmi důležitou fází interpolace je provedení tzv. průzkumové (explorační) analýzy prostorových dat (ESDA). Jejím cílem je zjistit základní informace o charakteru vstupních dat. Jedná se např. o prověření požadavků normality, stacionarity apod. ESDA většinou představuje analýzu rozdělení hodnot - analýzu histogramu, výpočet základní popisné statistiky včetně momentů vyššího řádu (asymetrie a špičatosti), analýzu kvantilového grafu (Q-Q grafu), případná transformace (log), zkoumání odlehlých hodnot a jejich případné odstranění, analýza trendu (a jeho případné odstranění u interpolačních metod, které to vyžadují). ESDA je nezbytným předstupněm úspěšné aplikace metod krigingu (Analysis, n.d.).

### 3.3.1 Kriging

Kriging je metoda prostorové interpolace, která vznikla v oblasti hornické geologie, která je pojmenována po jihoafrickém důlním inženýrovi Danie Krige. Byl průkopníkem v oboru geostatistiky a GIS prostorové interpolace (odhad neznámé hodnoty na povrchu ze vzorku známých hodnot), která se nazývá kriging. Kriging je důležitý pro oblast těžby a hodnocení nerostných surovin, ale má také mnoho dalších využití a dnes je v mnoha projektech GIS životně důležitým nástrojem (Briney, 2014).

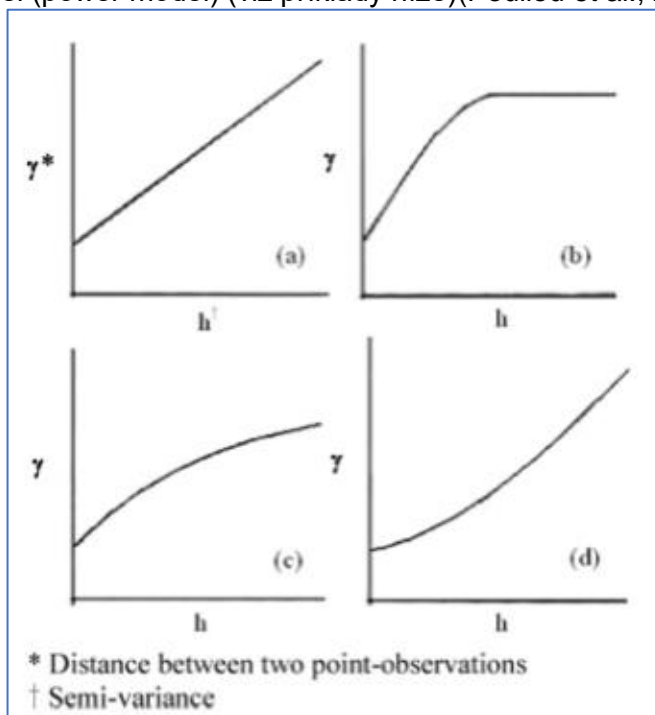
Kriging je jedna z několika metod, které používají omezenou množinu vzorkovaných datových bodů pro odhad hodnoty proměnné v souvislém prostorovém poli. Příkladem hodnoty, která se liší v náhodném prostorovém poli, může být průměrná měsíční koncentrace ozonu nad městem nebo dostupnost zdravých potravin napříč městskými oblastmi. Odlišuje se od jednodušších metod, jako je Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW), Linear Regression (lineární regrese) nebo Gaussian decays (Gaussův rozpad) tím, že využívá prostorovou korelaci mezi vzorkovanými body k interpolaci hodnot v prostorovém poli: interpolace je založena na prostorovém uspořádání empirických pozorování, spíše než na předpokládaném modelu prostorového rozdělení. Kriging také vytváří odhady nejistoty kolem každé interpolované hodnoty. Ve všeobecném smyslu jsou krigingové váhy vypočteny tak, že body blízké k umístění zájmu mají větší váhu než body, které jsou vzdálenější. Rozložení bodů je také vzato v úvahu, takže seskupení bodů má menší váhu (ve skutečnosti poskytují méně informací než jednotlivé body). To pomáhá snížit zkreslení v předpovědi. Prediktor krigingu je "optimální lineární prediktor" a přesný interpolátor, což znamená, že každá interpolovaná hodnota je vypočtena tak, aby se minimalizovala chyba předpovědi pro daný bod. Hodnota, která je vygenerována v procesu krigingu pro libovolné skutečně vzorkované místo, se bude rovnat

pozorované hodnotě v tomto bodě a všechny interpolované hodnoty budou nejlepšími lineárními nestrannými prediktory (BLUP) (Bivand, RS., Pebesma, E.J., Gomez-Rubio, 2008).

Kriging obecně nebude efektivnější než jednodušší metody interpolace, pokud mezi vzorkovanými datovými body existuje malá prostorová autokorelace (to znamená, pokud se hodnoty nemění v prostoru). Pokud je alespoň mírná prostorová autokorelace, kriging může být užitečnou metodou k zachování prostorové variability, která by byla ztracena použitím jednodušší metody (Auchincloss et al., 2007).

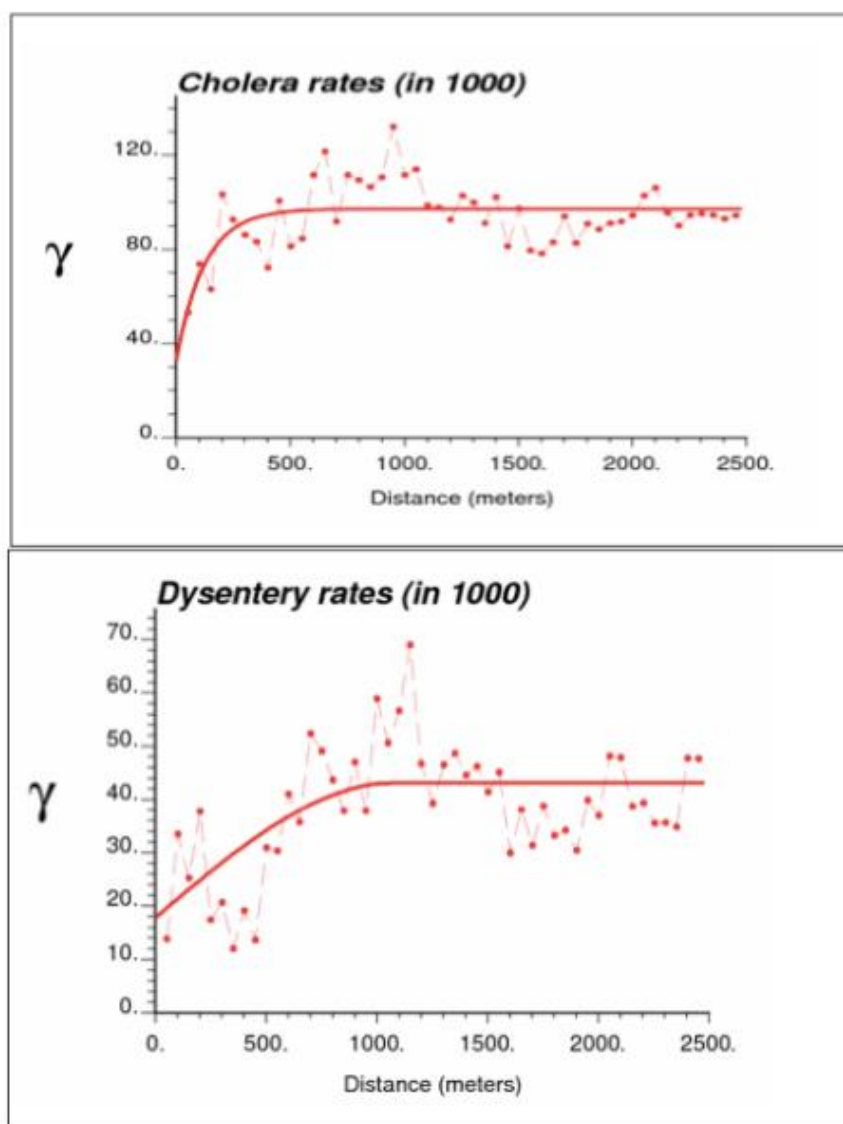
Kriging lze chápat jako dvoustupňový proces: jednak prostorová kovariační struktura vzorkovaných bodů je určena přizpůsobením variogramu; a za druhé, váhy odvozené u této kovariační struktury se používají k interpolaci hodnot pro nezasažené body nebo bloky v prostorovém poli (Waller et al., 2004).

Variogram (někdy nazývaný "semivariogram" je vizuální znázornění kovariance mezi jednotlivými dvojicemi bodů ve vzorkovaných datech. Pro každý pár bodů ve vzorkovaných datech je hodnota gama nebo „poloviční odchylka“ (vzdálenost poloviny středního čtvercového rozdílu mezi jejich hodnotami) vynesena proti vzdálenosti nebo mezi nimi. Experimentální variogram je graf pozorovaných hodnot, zatímco "teoretický" nebo "modelový" variogram je distribuční model, který nejlépe odpovídá datům. Typy variantních modelů jsou např. lineární, sférický, exponenciální a výkonový model (power model) (viz příklady níže)(Pouliou et al., 2008).



Obrázek 5: (a) Lineární semi-variogram; (b) sférický semi-variogram; (c) exponenciální semi-variogram; a (d) power semi-variogram (Pouliou et al., 2008)

Výběr modelu variogramu je zásadně definován uživatelem, ačkoli statistický software může často pomoci definovat nejlépe hodnocené modely pomocí různých přístupů, které zahrnují metodu nejmenších čtverců, maximální pravděpodobnost a Bayesovské metody. V následujícím příkladu variogramů pro míru cholery a úplavice v oblasti Bangladéže byl zvolen exponenciální model jako “best-fit” model pro variogram týkající se cholery, zatímco sférický model lépe vyhovuje mírám úplavice. V obou případech vzestupná křivka na krátkých úsecích znamená, že místa, která jsou blíže u sebe, jsou si navzájem více podobná než místa, která jsou vzdálenější. V určitém bodě (~ 300 m pro cholery a ~ 1000 m pro úplavici) gama hodnoty dosáhnou roviny, což naznačuje, že rozdíl mezi hodnotami v místech oddělených touto vzdáleností dosáhly hodnoty celkové odchylky vzorku (Ali et al., 2006).



Obrázek 6: (a) Lineární semi-variogram; (b) sférický semi-variogram; (c) exponenciální semi-variogram; a (d) power semi-variogram (Pouliou et al., 2008)

Váha každého interpolovaného bodu se vypočítá podle prostorové struktury interpolovaného místa ve vztahu ke všem vzorkovaným bodům. Váhy jsou určeny u variogramu založené na prostorové struktuře dat a jsou aplikovány na vzorkované body podle vzorce:

$$\hat{z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(\mathbf{x}_i)$$

*Rovnice 1: Výpočet váhy bodu u Kriginga (Ali et al., 2006)*

kde hodnota předpokládaného bodu se rovná součtu hodnoty každého vzorkovaného bodu pro určitou váhu daného bodu. Pro výpočet vah se používá kovarianční matice z odhadovaného variogramu, která se může lišit v závislosti na použitém podtypu krigingu (Le and Zidek, 2006).

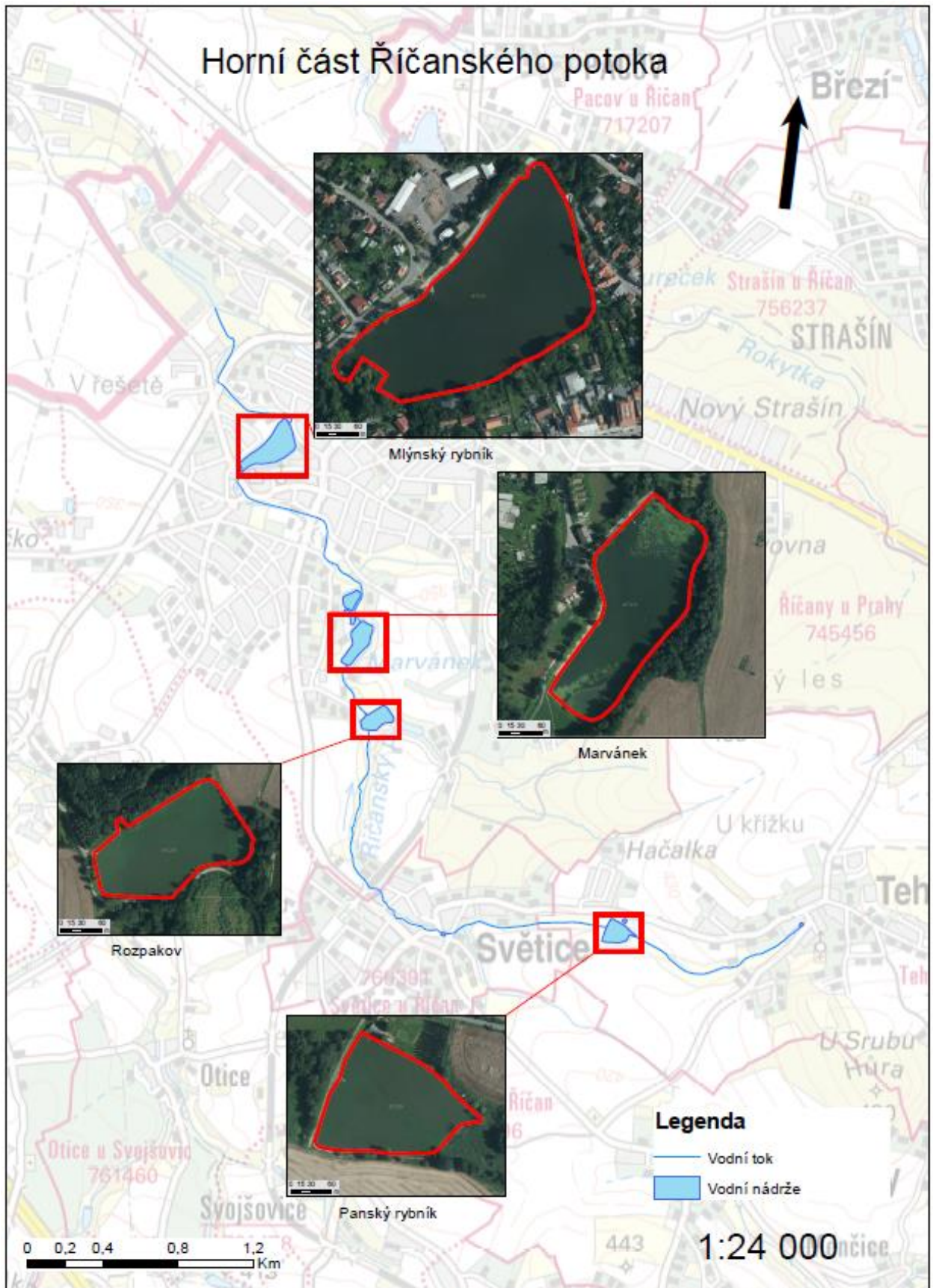
Existuje několik podtypů krigingu. První z nich je Ordinary kriging, pro který je nutno předpokladu stacionarity (průměr a rozptyl hodnot je konstantní v celém prostorovém poli). Jedná se o jednu z nejjednodušších forem krigingu. Jako další je Universal kriging, který uvolňuje předpoklad stacionarity tím, že dovoluje, aby se průměr hodnot lišil deterministickým způsobem na různých místech (např. pomocí nějakého prostorového trendu), zatímco pouze rozptyl je konstantní po celém poli. Tato stacionarita druhého řádu je často relevantním předpokladem s environmentálními expozicemi. Dalším podtypem je Block kriging, který odhaduje průměrné hodnoty nad mřížkovými "bloky" namísto jednotlivých bodů. Tyto bloky mají většinou menší chyby při předpovědi, než jsou zaznamenány u jednotlivých bodů. Jako další je Cokriging, ve kterém jsou další pozorované proměnné (které jsou často korelovány), aby se zvýšila přesnost interpolace proměnné, která je pro nás důležitá, v každé lokalitě. Existuje řada dalších podtypů např. Poisson kriging, Indicator Kriging a další (Bivand, RS., Pebesma, E.J., Gomez-Rubio, 2008).

Vzhledem k tomu, že váha interpolátoru krigingu závisí na modelovaném variogramu, kriging je poměrně citlivý na nesprávnou specifikaci modelu variogramu. Obecně platí, že přesnost interpolace krigingem bude omezena, pokud počet vzorkovaných pozorování je malý, data jsou omezena prostorovým rozsahem nebo nejsou ve skutečnosti dostatečně prostorově korelována. V těchto případech je jednoduchý variogram těžké generovat a metody, jako je lineární regrese, mohou být vhodnější než kriging pro prostorovou predikci (Bivand, RS., Pebesma, E.J., Gomez-Rubio, 2008).

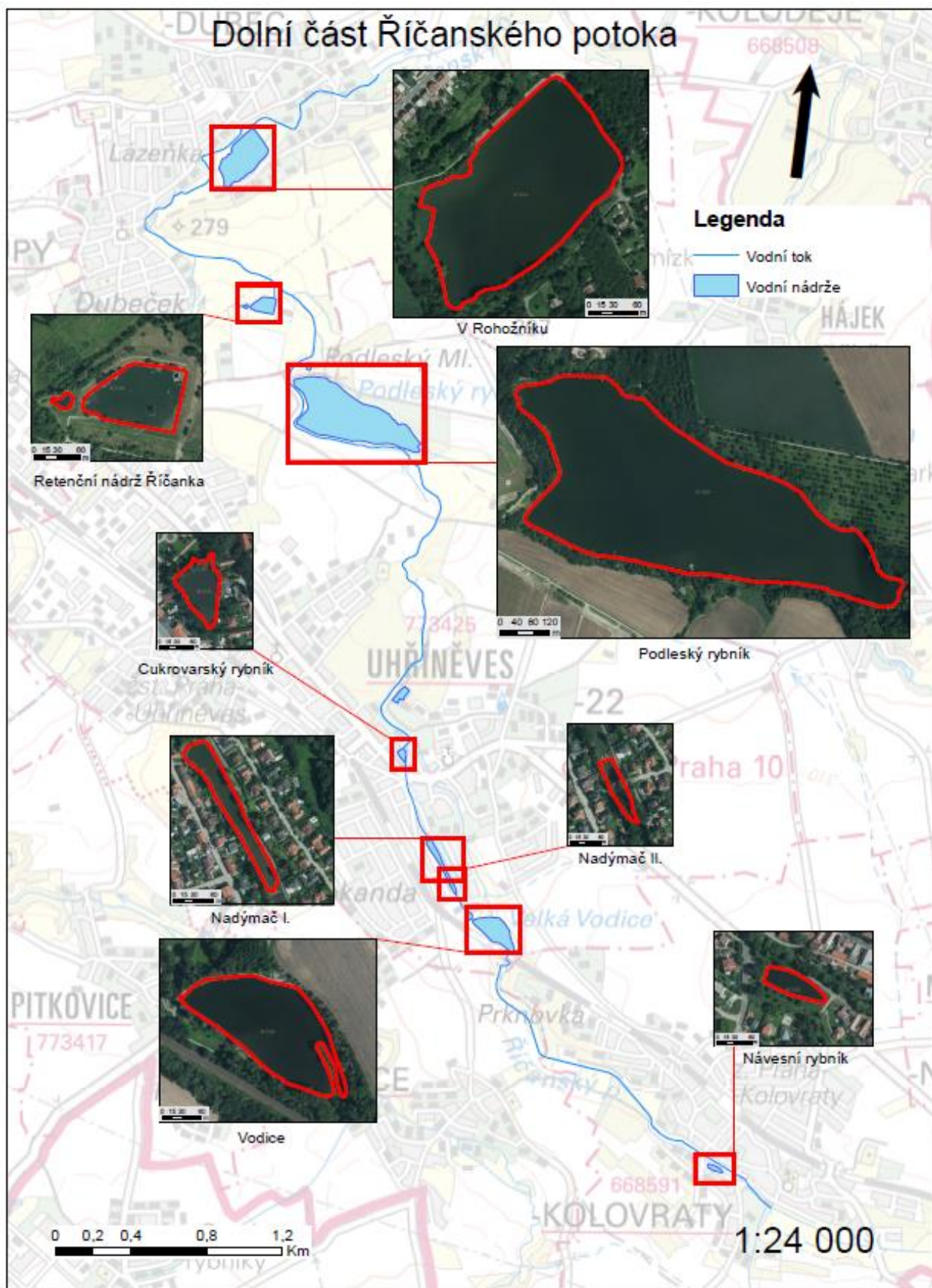
## 4 Charakteristika zájmového území

Hydrologicky spadá zájmové území k širšímu povodí Vltavy, povodí Říčanského potoka (Říčanky) ČHP 1-12-01-029 je levostranným přítokem Rokytky.

Říčanka pramení v Tehově ve výšce 440 m n. m., ústí zleva do Rokytky pod Běchovicemi v 230 m n. m., plocha povodí činí 37,5 km<sup>2</sup>, délka toku 21,0 km. Průměrný průtok u ústí 0,10 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Mimopstruhová voda, čistota vody III. – IV. třídy. Potok prochází od jihovýchodu na severozápad. Směr toku je převážně přímý, s vysazenými a zčásti spontánními břehovými porosty (topol, vrba, olše, bez černý), místy bez vegetačního doprovodu. Průtoky značně kolísají, protože do vodoteče přitéká velké množství vody z oblasti Říčan, kde je z 90 % jednotná kanalizační síť a veškerá voda (dešťová i odpadní) jde po vyčištění do vodoteče. Koryto potoka bylo v minulosti upravováno (1972), místy je nevhodné zpevnění, místy je vodoteč zcela vedena v novém korytě mimo původní trasu. Dno i pata svahu je zpevněna, dno je z větší části kamenité a zanesené bahnem. Převážná část zemědělských pozemků je odvodněna systematickou drenáží staršího data do Říčanky. Kvalita vody v Říčanském potoce není uspokojivá, voda je znečištěna, dno koryta je pokryto říčními sedimenty. Říčanský potok je recipientem pro kolovratskou a říčanskou čistírnu odpadních vod. Průtoky mají stoupající tendenci, vzhledem k tomu že přibýlo zpevněných ploch v oblasti Říčan i Kolovrat.



Obrázek 7: Horní část povodí Říčanského potoka se zobrazením vodních nádrží (Dibavod, 2018)



Obrázek 8: Dolní část povodí Říčanského potoka se zobrazením vodních nádrží (Dibavod, 2018)

## 4.1 Panský rybník

Průtočný rybník Panský se nachází mezi obcemi Světice a Tehov. Rybník byl obnoven v letech 1971–1975 v rámci akce „Z“. V roce 1976 po schválení trvalého provozu vodohospodářského díla bylo rozhodnuto, že hospodářsky bude využívat rybník jako rybochovný místní organizace rybářů Českého rybářského svazu. Těleso hráze je nasypáno z místního homogenního materiálu s polohovým využitím staré původní hráze. Návodní líc hráze je opevněn v horní části vegetačními tvárniciemi opřenými o ocelová svodidla přichycená na svislé zaberaněné opěry. Vlivem povětrnostních a vodních vlivů jsou části břehů podemlety a tvárnice opevnění hráze je částečně rozrušeno. Rovněž ocelová svodidla jsou na několika místech vychýlena a zohýbána. Jako výpustné zařízení pro manipulaci při regulaci hladiny a zároveň jako bezpečnostní přeliv slouží betonový funkční objekt v jehož přední části je umístěn dvojitý požerák navazující na spadiště bezpečnostního přelivu. K požeráku je ze břehu přes šachtu provedena ocelová lávka. Odpad od funkčního objektu je proveden z betonových trubek DN 100. V dohledné době je plánováno odbahnění rybníka (Prášek, 2017).



Obrázek 9: Panský rybník (Autor práce, 2018)

## 4.2 Rozpakov

Rybník Rozpakov je situován na jižním okraji obce Říčany, přímo pod rybníkem Srnčí a přibližně 320 m nad vzdušným rybníkem Marvánek. Vybudován byl v letech 1989–1990. Jedná se o průtočný rybník. Součástí vodního díla je požerák a bezpečnostní přeliv. Hrázové těleso rybníka je sypané zemní, homogenní. Půdorysně je hráz rybníka přímá a je umístěna na severozápadní straně nádrže. Celková délka hráze je 134 m. V příčném řezu má hráz tvar lichoběžníku. Návodní svah je opevněn



kamenným pohozením z lomového kamene, nad úrovní vody je svah prorostlý trávou. Pro vypouštění vody z nádrže slouží otevřený železobetonový požerák s dvojitou dlužovou stěnou umístěný v blízkosti bezpečnostního přelivu. Nehrazený, přímý bezpečnostní přeliv slouží k převádění běžných i povodňových průtoků. Přelivnou hranu bezpečnostního přelivu tvoří zaoblený betonový práh. Odpad od bezpečnostního přelivu je veden skluzem s jedním výškovým lomem do vývaru. Na rybníku není pro kontrolu úrovně hladiny vody osazena vodočetná lať. Celkový zadržovaný objem vody v nádrži při  $H_n$  je podle Manipulačního a provozního řádu rybníka Rozpakov (2015) 13 795 m<sup>3</sup>. V okolí rybníka se nacházejí zemědělské plochy, takže je velmi pravděpodobné, že rybník je zanášen sedimenty v důsledku eroze půdy na těchto plochách (TBD a.s., 2015).



Obrázek 10: Rybník Rozpakov (Autor práce, 2017)

### 4.3 Marvánek

Rybník Marvánek se nachází na okraji města Říčany a vede kolem něj naučná stezka Říčansko a také cyklostezka Krajem Josefa Lady. U přítoku do nádrže je umístěna dělicí hrázka, která odděluje plochu 2540 m<sup>2</sup> od plochy volné hladiny rybníka. Dělicí hrázka odděluje litorální zónu nádrže a zátoku hlavního prostoru rybníka. Hrázka je propustná, umožňující tak volné protékání vody. Litorální pásmo je nepravidelně osázeno rostlinami. Těleso hráze je sypané zemní a materiálově homogenní. Návodní líc je zpevněn dlažbou z lomového kamene. Vzdušný líc je zpevněn osetím, koruna zarovnána s terénem. Bezpečnostní přeliv je betonový, lomený s obdélníkovým příčným průřezem. Betonový odpad od přelivu ústí pod lávku v tělese hráze a pokračuje dále jako Říčanský potok. Výpustné zařízení je tvořeno dvěma trubkami DN 300, které jsou zaústěny do potoka pod hrází. Objekt požeráku je umístěn přibližně v 1/3 délky hráze od bezpečnostního přelivu. Požerák je

uzavřený, dvoudlužový a je uzavíratelný uzamykatelným poklopem. Jako manipulační zařízení slouží jednoduchý požerák, který je součástí bezpečnostního přelivu. Je využíván pro částečné vypouštění rybníka při čištění koupaliště nebo k manipulaci s hladinou. Požerák nemá vliv na převádění povodňových průtoků přes bezpečnostní přeliv. Objem rybníka při  $H_n$  je podle Manipulačního řádu pro rybník Marvánek 35 910  $m^3$ . V minulosti došlo k opravě rybníka a jeho odbahnění, aby mohl sloužit ke koupání a letní relaxaci. Nicméně v roce 2016 se hráz opět propadla a probíhala další oprava (Město Říčany, 2017).



Obrázek 11: Rybník Marvánek (Autor práce, 2018)

#### 4.4 Mlýnský rybník

Mlýnský rybník se nachází v západní části města Říčany. Vybudován byl ve 13. století společně s hradem. Rybník je průtočný a jeho součástí je spodní výpust a bezpečnostní přeliv. Hráz je homogenní z místních materiálů, zemní sypaná délky 265 m. V příčném řezu má hráz tvar lichoběžníku. Návodní svah je opevněn kamenným pohozením a výše je zatravněn. Vzdušný svah je porostlý stromovou vegetací, s travním porostem. Směrově je hráz pravouhle zalomena a je umístěna při severní straně nádrže. Pro vypouštění rybníka slouží betonové potrubí DN 500 hrazené prefabrikovaným požerákem, který je umístěn v patě návodního svahu hráze. Před požerákem je vybudováno loviště s kádištěm. Nehrazený, kašnový bezpečnostní přeliv je umístěn v pravém závězu hráze, s přelivnou hranou o dvou úrovních. Voda z přelivné hrany přepadá do betonového spadiště, na které navazuje skluz opevněný kamennou dlažbou. Vodočetná lať je osazena na levém boku požeráku spodní výpusti. Celkový objem zadržené vody v rybníku při  $H_n$  je podle Manipulačního a provozního řádu Mlýnského rybníka (2016) 99 210  $m^3$ . V roce 2015 byl Mlýnský rybník odbahněn a celkově rekonstruován z důvodu náporu velké vody

v červnu 2013, kdy byla značně poškozena hráz a do budoucna by hrozilo nebezpečí protržení hráze (Město Říčany, 2015).



Obrázek 12: Mlýnský rybník (Autor práce, 2017)

#### 4.5 Návesní rybník

Rybník byl vybudován v letech 1895-6 jako zdroj užitkové vody a požární vody zahloubením do levého břehu, později návsi obce. Rybník je nyní napájen napouštěcím potrubím z jezu na Říčance. Hloubka rybníka dle dosavadních podkladů dosahuje až 2,5 metru. Od svého vybudování byly obvodové svahy, břehy mnohokrát výrazně měněny a opravovány a rybník byl při této příležitosti i odbahňován. V minulosti sloužil rybník také jako zdroj ledu pro chlazení. V roce 1955 došlo k velké rekonstrukci rybníka, který byl výrazně prohlouben, obrouben betonovou zdí a okolí bylo upraveno a zatravněno. Koncem 20. století pak byl zatrubněn přepad z rybníka, který využíval bývalé mlýnské strouhy, a tím také zanikla poslední funkční připomínka kolovratského mlýna. Nynější přepad je zaústěn do dešťové kanalizace a odtud do Říčanky. Rybník je neprůtočný. V roce 2009 byla provedena celková revitalizace rybníka. V rámci revitalizace šlo o navrácení technického díla blíže přírodnímu charakteru při zachování jeho funkce. Nevzhledné betonové zdi byly vyměněny za konstrukce z přírodního kamene, odpovídající daným lokalitám. Veškeré práce spojené s revitalizací Návesního rybníka měly za účel vylepšit stávající stav

neudržovaného historického díla s jeho začleněním do návsi při vylepšení jeho vzhledu (Jílek, 2009).



Obrázek 13: Návesní rybník (Autor práce, 2018)

#### 4.6 Vodice

Jedná se o obtočnou vodní nádrž na Říčanském potoce. Spolu s Nadýmačem I. a II. tvoří rybníční soustavu. Je využívána především k akumulaci vody a sportovnímu rybolovu. Vodní nádrž vznikla přibližně v 16. stol., kdy pravděpodobně vznikla rozlehlá rybníční soustava v okolí Uhříněvsi a Dubče. Má zemní homogenní čelní hráz, která je opevněná na návodní straně kamenným pohozením, na koruně je zpevněná pěšina. Vzdušný svah je porostlý stromovou vegetací, s travním porostem. Hlavní výpustní zařízení je betonový požerák s výpustným potrubím. Požerák je umístěn v pravé straně čelní hráze. Nádrž má obtokovou strouhu. Hlavní bezpečnostní přeliv je čelní – přímý přeliv typu jezu s kamennou přelivnou hranou. Na přítoku do nádrže je umístěn rozdělovací objekt, který umožňuje průtok buď do nádrže nebo do obtokové strouhy. V levé části hráze je umístěn stavidlový uzávěr, který slouží pro napájení Nadýmače I a II. Objem zadržené vody v nádrži při  $H_n$  je podle Provozního a manipulačního řádu nádrže Vodice (2008)  $31\,760\text{ m}^3$ . Revitalizace

vodní nádrže a parková úprava v okolí proběhla v letech 2009-2010 (Město Uhřetěves, 2010).



Obrázek 14: Vodice (Autor práce, 2018)

#### 4.7 Nadýmač II

Jedná se o druhou vodní nádrž rybníční soustavy napájenou bývalým mlýnským náhonem z Vodice. Nádrž je protáhlého tvaru a je využívána především k akumulaci vody a chovu ryb. Má zemní homogenní čelní hráz, která je na návodní straně opevněna kamenným pohozelem. Ve střední části hráze je umístěn sdružený objekt sestávající se z nehrazeného betonového přelivu a požerákové výpusti, která je vyústěna do vodní nádrže Nadýmač I. Celkový objem zadržené vody v nádrži při  $H_n$  je podle Provozního a manipulačního řádu Nadýmač II 3000 m<sup>3</sup>. Nádrž se nachází v husté zástavbě a po její levé straně je lemována cyklostezkou (Město Uhřetěves, 2008).



Obrázek 15: Nadýmač II (Autor práce, 2018)

## 4.8 Nadýmač I

Jedná se o poslední vodní nádrž rybníční soustavy napájenou bývalým mlýnským náhonem z Nadýmače II. Nádrž je obdélníkového tvaru a slouží zejména k akumulaci vody a sportovnímu rybolovu. Má zemní homogenní čelní hráz, která je na návodní straně opevněna kamenným pohozením. Hlavní výpustí je sdružený objekt sestávající z hrazeného stavidlového přelivu a požerákové výpusti. Celkový objem při  $H_n$  je podle Provozního a manipulačního řádu Nadýmač I (2008) 8 500 m<sup>3</sup>. Přes vodní nádrž je vybudována dřevěná lávka pro chodce (Město Uhřetěves, 2008).



Obrázek 16: Nadýmač I (Autor práce, 2018)

## 4.9 Cukrovarský rybník

Rybník je průtočný, leží na bočním obtoku Říčanského potoka. Rybník těsně přiléhá k parku z jedné strany (západní) a k zástavbě a zahradám na straně druhé (východní). Hráz a výpustné zařízení je v nevyhovujícím stavu. Rybník je značně zanesený sedimentem, mocnost vrstvy přesahuje 1 m. Z důvodu tohoto stavu je na rok 2018 naplánováno odbahnění a celková revitalizace. Studie pro revitalizaci rybníka navrhuje jeho vypuštění, vylovení, odbahnění a vystavění nového vypouštěcího zařízení (požeráku). Levý břeh je navrženo prořezat a po celé délce zpevnit hrází, vedle které by byla po celé délce dřevěná lávka pro pěší. Návrhová kapacita revitalizovaného díla při  $H_n$  by měla dosahovat 3 300 m<sup>2</sup> (Růžička, 2017).



Obrázek 17: Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018)

#### 4.10 Podleský rybník

Rybník je řešen jako obtočný, obtokové koryto je vedeno při levém břehu a slouží k převádění průtoků do profilu pod hráz rybníka. Jeho historie sahá až do 16. století. Napouštění rybníka je umožněno jednoduchým rozdělovacím objektem s ruční manipulací. Vzhledem k charakteru rybníka je v korytě potoka stálý průtok závislý na momentální hydrologické situaci. Hlavní účel Podleského rybníka je rybochovný, slouží jako záložní zdroj vody pro případné hašení požáru. Rybník je také významným krajinným prvkem. Hráz rybníka je zemní, zřejmě homogenní, z místního materiálu. Situačně je mírně oblouková směrem po vodě. Hráz je porostlá vzrostlými stromy a keři. Jako vypouštěcí zařízení slouží železobetonový požerák. Rybník má dva bezpečnostní přelivy. První je řešen jako postranní přeliv, hrazený pěti stavidlovými tabulemi. Před objektem je dřevěná česlová stěna, která by měla být zcela odstraněna z důvodu výrazného omezení průtočné plochy přelivu. Druhý je bezpečnostní přeliv jalový, který je umístěn cca 15 m od hrazeného přelivu. Má betonovou přelivnou hranu, délky 8,6 m. Před vlastním přelivem je situováno pole česlí šípového tvaru. Z důvodu bezpečnosti vodního díla při povodni je nutné odstranění těchto česlí. Celkový objem rybníka při  $H_n$  je Podle Manipulačního řádu Podleského rybníka 310 000 m<sup>3</sup> (Sedláček, 2004). Pod hrází se nacházejí několik staletí staré chráněné duby a zříceniny Podleského mlýna. Údajně se v Podleském

rybníce pravidelně koupal prezident T. G. Masaryk, který sem zajížděl z nedalekých Kolodějí ( Praha zelená, 2018).



Obrázek 18: Podleský rybník (Autor práce, 2017)

#### 4.11 Retenční nádrž Říčanka

Nádrž byla vybudována v 1. polovině 80. letech jako umělá nádrž pro zachycení zvýšených průtoků a znečištění z plánované průmyslové zóny v oblasti Uhříněvsi. Plánovaný rozvoj průmyslové zóny však nikdy nebyl naplněn. Říčanka je umělou nádrží se zemní hrází. Jedná se o průtočnou nádrž napájenou dešťovým sběračem jako občasný levostranný přítok Říčanského potoka. Plocha povodí odvodňovaného urbanizovaného území je cca 0.6 km<sup>2</sup>. V roce 2011 byla zahájena celková revitalizace a úprava nádrže. Při odbahnění nádrže bylo odvezeno 1000 m<sup>3</sup> sedimentu. V roce 2012 byla provedena úprava bezpečnostního přelivu a celý betonový objekt byl zasanován a obložen kamenem. V nátokové části se nacházela sedimentační jímka, která měla zabraňovat zanášení nádrže. Toto řešení se ale neosvědčilo, protože čištění těchto jímek je velmi nákladné a většina splavenin se stejně dostane až do nádrže. Proto byla celá betonová sedimentační jímka odstraněna a přetvarována na jezírko. Odtok z tohoto jezírka do nádrže je přes kamennou hráz s přelivným průlehem a sestavou paralelních těsnících prahů vytvářející na odtoku kaskádu s dalšími malými vodními plochami. Nádrž je využívána i k extenzivnímu chovu ryb a každý podzim se zde provádí výlov. Návodní svahy obvodové hráže jsou stabilizovány polovegetačními panely, zbývající břehy tvoří vegetační opevnění. Vzdušná strana hlavní hráže je zatravněna s bohatým porostem a lokálně s náletovými dřevinami. Jako objekt spodní výpusti slouží požerák, který je situován do čela sdruženého objektu a vyúsťuje do spadiště bezpečnostního přelivu. Přelivná hrana u nehrazeného kašnového bezpečnostního přelivu je opatřena kamoňezem šířky 80 cm a je 21 m dlouhá, prakticky po celém obvodu



obdélníkového spadiště. Objem vody v nádrži při  $H_n$  je podle Manipulačního řádu pro RN Říčanka 14 472 m<sup>3</sup> (Lesy hl. m. Prahy, 2015).



Obrázek 19: Jezírko umístěné na vtoku do nádrže Říčanka. (Autor práce, 2017)



Obrázek 20: Retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2017)

#### 4.12 V Rohožníku

Neprůtočný rybník Rohožník se nachází na území hl. m. Prahy, ve středu městské části Dubeč. Historicky rybník tvořil soustavu ze dvou přibližně stejných rybníků, výše položený rybník již neexistuje. Napájení Rohožníku je bočním pravobřežním odběrným objektem z Říčanského potoka, procházejícím bývalou hrází horního rybníka. Rybníky byly vybudovány v 19. století, do dnešní doby se dochoval funkční jen dolní rybník. V roce 2014 byl rybník odbahněn, byla opravena boční (dělicí hráz s Říčankou) a hlavní hráz a vystavěn nový požerák s odpadním potrubím zpět do Říčanky. Rybník je umělou nádrží se zemní homogenní hrází. Vodní bilance

rybníka Rohožník s malým odběrem z kapacitního průtoku Říčankou plně nezávisí na hydrologické situaci v povodí. Objekt spodní výpusti je situován do levého rohu styku hlavní a boční hráze na návodní straně. Je tvořen obezděným betonovým otevřeným třídlužovým požerákem a plastovým odpadním potrubím DN 560 mm. Na rybníku je v rámci sdruženého objektu situován nalevo, těsně vedle požeráku bezpečnostní přeliv ve tvaru mělkého průlehu. Přelivná hrana je stabilizována masivním těsněným kamenným prahem. Celkový objem vody v rybníce při  $H_n$  je podle Manipulačního řádu pro rybník Rohožník 61 520 m<sup>3</sup>. V současné době je rybník krajnotvorným prvkem, zadržuje vodu v krajině a zvyšuje druhovou rozmanitost (funkce biodiverzity) (Lesy hl. m. Prahy, 2015).



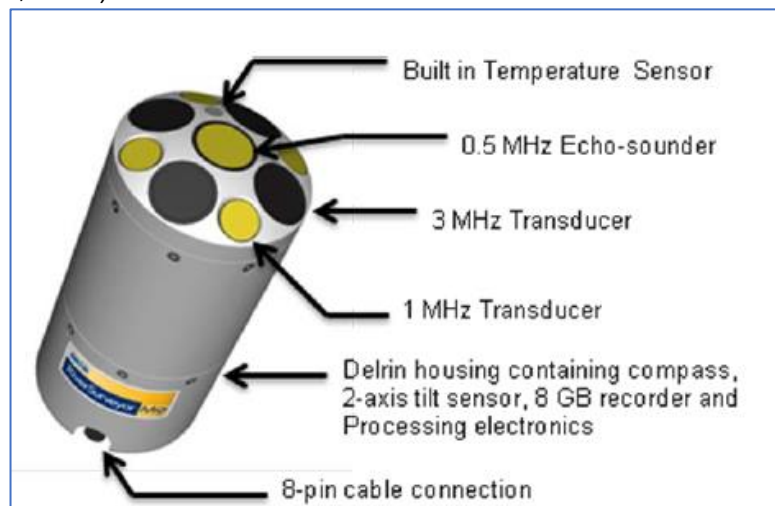
Obrázek 21: Rybník V Rohožníku (Autor práce, 2017)

## 5 Metodika

### 5.1 Měřicí aparatura

Přístroj RiverSurveyor M9 od firmy SonTek je robustní a vysoce přesným systémem ADCP, který je speciálně navržen pro měření říčního průtoku, rychlostního příčného profilu proudu vody a hloubky z pohyblivého nebo stacionárního plavidla. Při měření hloubek dokáže přístroj měřit v rozsahu od 0,2 m do 80 m. Systém RiverSurveyor kombinuje nejmodernější a osvědčené akustické přístroje ADCP se softwarem pro PC a mobilní zařízení. Celý systém se skládá z několika součástí: Devíti-paprskového těla měřícího přístroje RiverSurveyor M9, které tvoří procesní elektroniku, kompas, dvouosové náklonové čidlo, teplotní čidlo, 8 GB vnitřní paměti, 4 čidla o frekvenci 3 MHz, 4 čidla o frekvenci 1 MHz a jedno čidlo (echosounder) o

frekvenci 0,5 MHz, které je umístěno ve středu. Tělo M9 je propojeno s napájecím a komunikačním modulem. Při normálním nastavení je na těle M9 umístěna anténa, která je skrze kabel samostatně s napájecím a komunikačním modulem propojena přes koaxiální kabel. Vysoký stupeň přesnosti a snadné používání umožňuje měřit s jistotou, aniž by se muselo měnit nastavení měření pro konkrétní povodí řeky (SonTek YSI, 2010).



Obrázek 22: Tělo sonaru přístroje RiverSurveyor M9 (SonTek YSI, 2010)

Kompletní měřicí systém se skládá z konstrukce vlastního sonaru a jeho nosiče (plavidla), k němuž je systém při sběru dat připevněn. Plavidlo by mělo být konstruováno tak, aby splňovalo potřeby z fyzikální podstaty způsobu měření, rozsahu použití a uživatelského komfortu. Pro měření byla použita přestavěná závodní debl kánoe na kajak značky Vajda. V jednom otvoru je umístěno měřicí zařízení a v druhém je místo pro jednu osobu, která ovládá loď pomocí pádla. Loď umožňuje zakrytí měřicího přístroje, takže je vhodná pro celoroční měření. Celý přístroj je upevněn na loď z nevodivého materiálu, jelikož přístroj obsahuje kompas a náklonoměr, pomocí kterých jsou při měření korigovány náklony lodi do všech tří směrů. Konstrukce plavidla bere v úvahu eliminování tvorby bublin procesem kavitace, a proto je tělo sonaru osazeno před osobou řídící loď. Při záběru pádlem do vody tedy nedochází k tvorbě vírů, které by ovlivnili přesnost měření. Tělo sonaru M9 je připevněno prostřednictvím kónického tubusu, který je po celé své délce utěsněn

okroužkem z pružné pěny tak, aby nedošlo k nechtěné změně výšky sonaru a aby nedocházelo k zatékání (Hradilek et al., 2017).



Obrázek 23: Připevnění a stabilizace měřicí aparatury RiverSurveyor M9 na kajaku (Hradilek et al., 2017)

## 5.2 Princip použité metody měření

Přístroj vysílá v jednom okamžiku zvukové paprsky o všech přednastavených frekvencích. Při využití přístroje pro měření batymetrie bývá akcentován jeden zvukový paprsek o frekvenci 0,5 MHz. Impuls prochází skrz vodu, ode dna se odráží a putuje zpět k hladině, až jej sonar opět zachytí. Z času, který zvukový signál o známé frekvenci potřeboval k překonání vodního sloupce o známé konduktivitě a teplotě, vypočte uraženou vzdálenost, tedy hloubku a tím poskytuje přesný profil dna. Vlastní měření s plavidlem lze provádět na jakékoli vodní ploše. Důležitou přípravou před vlastním měřením je vyhledání nejvhodnějšího místa v okolí vodní plochy pro umístění stanice RTK a odhadnutí případných lomových linií (brod, skalní výběžek, bývala silnice) v nádrži. Tyto geomorfologické prvky by měly být, při mapování zohledněny a co nejlépe zaměřeny. Před měřením je nutné na místě provést kalibraci kompasu přístroje. Kalibrace se provádí tak, že dvě osoby, které provádí kalibraci, drží měřící plavidlo zvednuté ve vzduchu, každá osoba na jednom kraji a současně provádí dva specifické pohyby zároveň. Prvním pohybem je krouživý pohyb podle vodorovné osy. Druhým pohybem je naklánění ve vertikále v rozsahu okolo 45° nahoru a dolů od vodorovné roviny. Celkový čas kalibrace nesmí být kratší než 90

vteřin. Po sestavení přístroje a úspěšném dokončení kalibrace je možné začít měření. Hustota naměřených dat a jejich geometrie by měla být naplánována předem a měla by reflektovat potřeby zaměření a geomorfologii nádrže. Potřeby zaměření mohou být různé dle rozlišení výsledného DMT dna nádrže a velikosti požadované statistické chyby, která je vyjádřena např. pomocí RMSE. Naměřená data přístrojem neudávají validní informace o nadmořské výšce a proto je nutné v případě potřeby těchto dat získat informace z jiného zdroje (Hradilek et al., 2017).



Obrázek 24: Měření pomocí aparatury RiverSurveyor M9 na kajaku (Autor práce, 2017)

### 5.3 Zpracování naměřených dat

Naměřená data echosounderem byla nejprve vyhodnocena a upravena v softwaru RiverSurveyor Live. V prvním kroku zpracování je důležité zhodnotit, které informace budou použity pro určení polohy jednotlivých bodů (x, y, z). Existuje několik možností nastavení pro určení hloubky a polohy (x, y, z), například lze zvolit, která použitá frekvence zobrazuje lepší data o měřených hloubkách (Hradilek et al., 2015). Poté byla data exportována do tabulky v souřadnicích (x, y, z) v souřadnicovém systému WGS 1984 UTM 33N. Data byla vizualizována a dále upravována v ArcGIS 10.5.1. ArcGIS je software americké firmy ESRI, Inc. ArcGIS tvoří sada produktů pro vytváření, správu, analýzu a vizualizaci dat. Všechna použitá data byla pomocí transformace sjednocena do souřadnicového systému WGS 1984 UTM 33N. Jednalo se o podkladové mapy a údaje z DIVAVODU. Pro vytvoření DMT dna jednotlivých nádrží byla použita interpolační metoda Universal Kriging, která je detailně popsána

výše. Jedná se o pokročilou geostatickou metodu, která generuje odhadovaný povrch z rozptýleného souboru bodů se známou hodnotou z. Pro určení přesnosti výsledných DMT, byla použita střední kvadratická chyba (RMSE), která určuje odchylky mezi původními naměřenými daty a daty digitálních modelů. Nakonec byly pomocí funkce „surface volume“ určeny objemy nádrží. Funkce odvozuje data z rastrů DMT na danou úroveň, v našem případě na úroveň hladiny. Na základě znalosti jednotlivých objemů v nádržích byly sestrojeny měrné křivky. Měrná křivka je vztah mezi vodním stavem a objemem vody v nádrži.

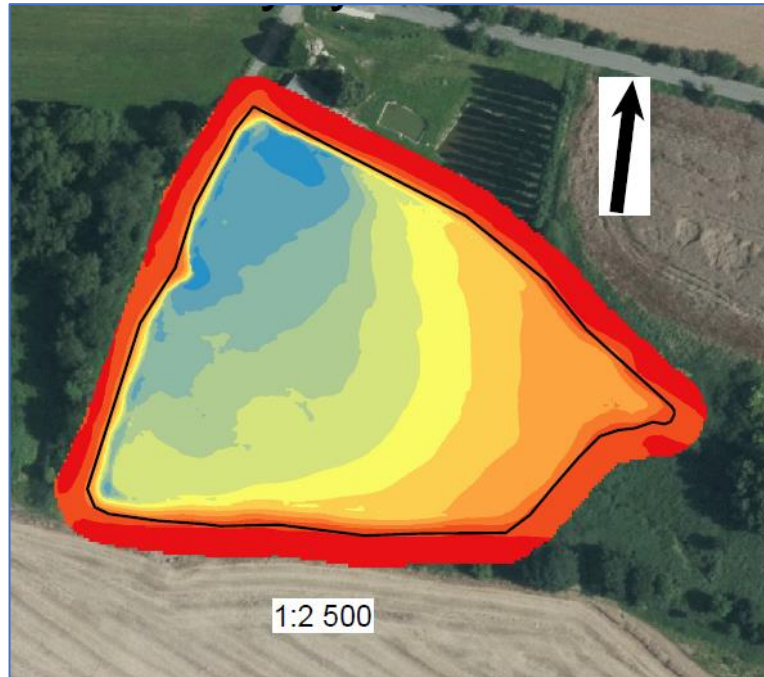
## 6 Výsledky

Na základě naměřených dat z echosounderu a zpracování v ArcGIS bylo určeno, že celkový objem MVN na Řičanském potoce v roce 2017 byl 591 241,41 m<sup>3</sup>. Průměrná chyba RMSE u celé soustavy je 0,201 m. Velikost chyby závisí jednak na použité interpolační metodě, která nebyla pro některé vodní nádrže neoptimálnější, ale také na hustotě a prostorovém uspořádání měřených dat. V některých částech vodních nádrží nebylo možné optimální měření např. z důvodu velmi malé hloubky, spadných větví nebo vodních rostlin. Lze říci, že určené objemy mohou korespondovat se skutečností. Při porovnání objemů z našeho měření a objemů z manipulačních řádů je evidentní negativní trend využitelného objemu nádrží, který se v průběhu času snižuje, důsledkem zanášení nádrží sedimenty. Porovnání objemů je pouze odhad, protože objemy uvedené v manipulačních řádech, jsou často velice nepřesné, a to zvláště u nádrží, které nebyly revitalizovány. Pro přesnější rozdíl snižování objemů nádrží, by se muselo měření opakovat v určitém časovém intervalu a jednotlivé výsledky porovnat.

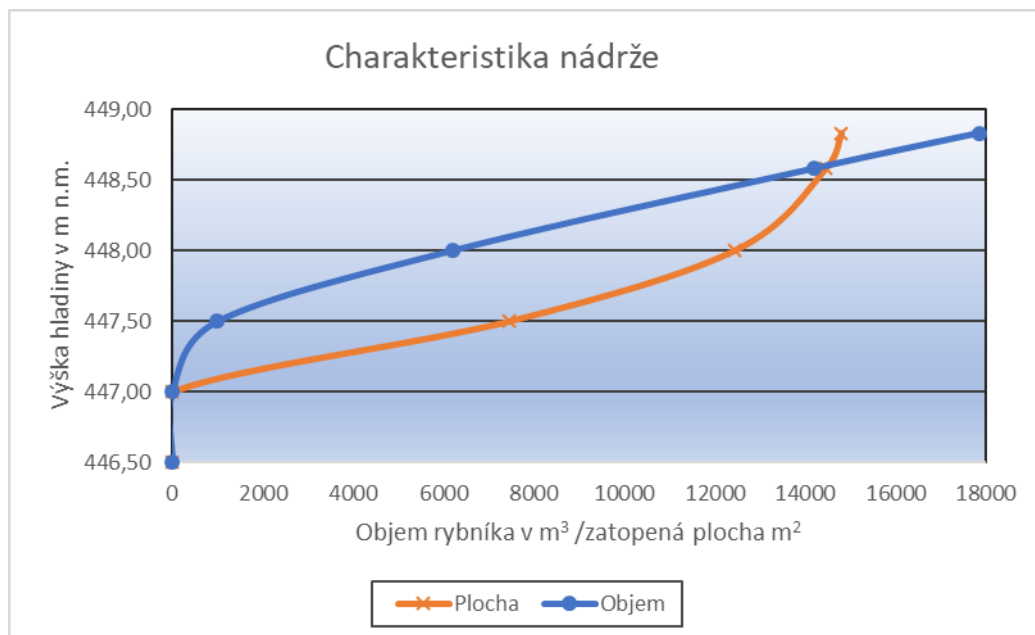
Panský rybník je využíván k rybochovu. Největší hloubka, jak je vidět na obr. 25, je u výpustného zařízení a v levé části od hráze, kde se nachází molo, které je využíváno rybáři. Celkový stav rybníka není uspokojivý, kdy více jak 30 let nebyl nijak udržován. Proto je předpoklad velkého množství sedimentu. Na příští rok je naplánován projekt na jeho odbahnění. Určený objem rybníka je 26 917,09 m<sup>3</sup> s RMSE 0,186 m.

Objem z projektu odbahnění (m <sup>3</sup> )	31760,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	26917,09
RMSE (m)	0,186
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-4842,91

Tabulka 1: Porovnání objemů Panský rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 25: Interpolace Panský rybník (Autor práce, 2018)

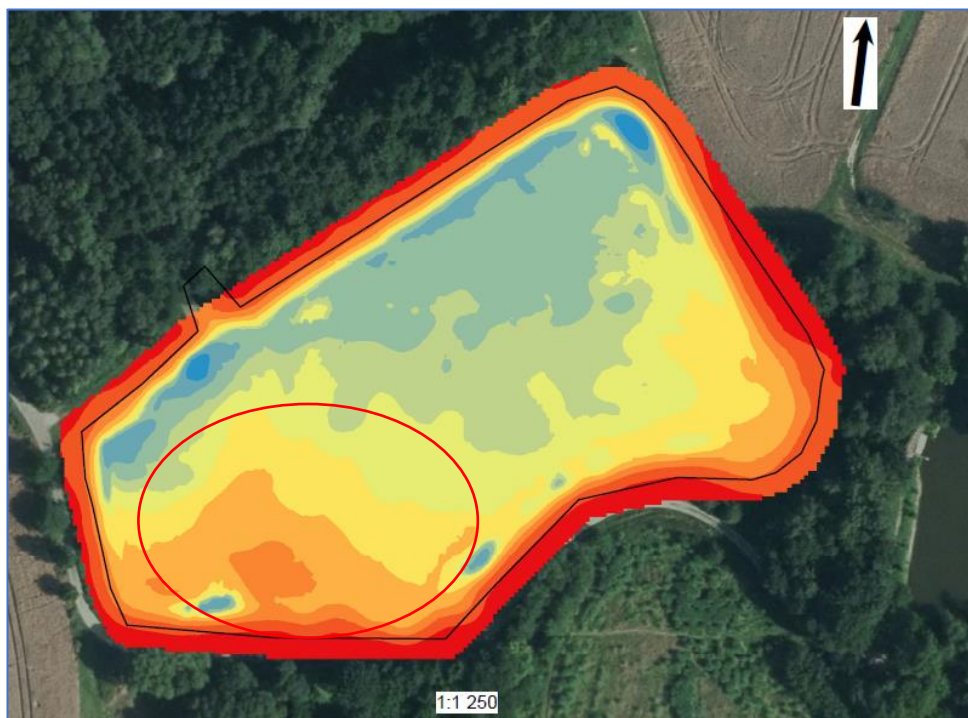


Obrázek 26: Charakteristika Panský rybník (Autor práce, 2018)

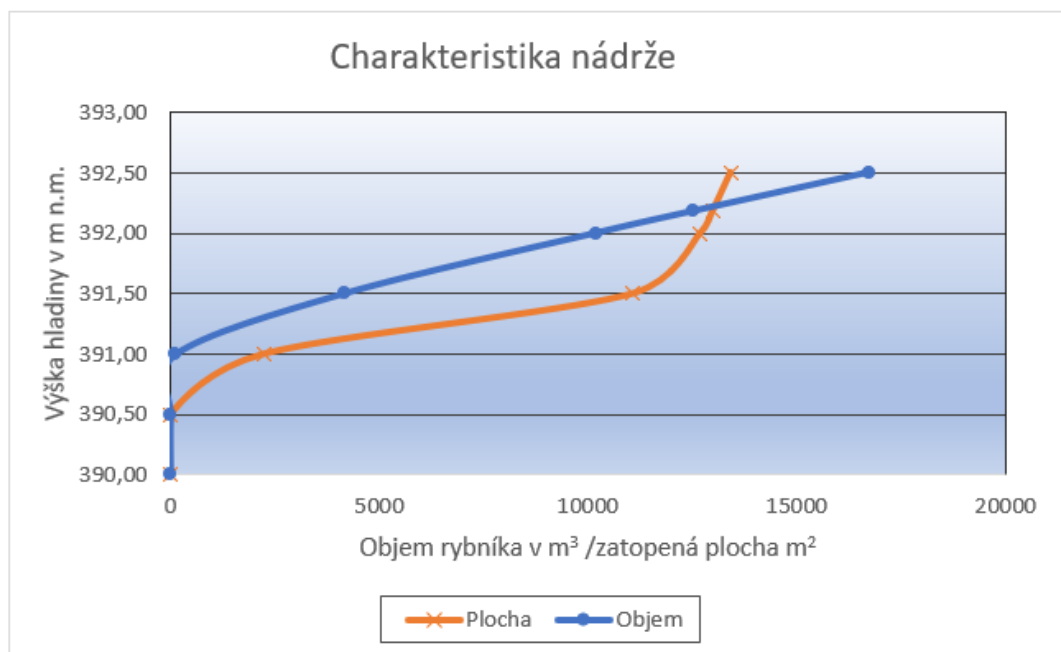
Rybník Rozpakov má dva přítoky z levé strany se vlévá Říčanský potok a z pravé strany vyústění vodní nádrže Srnčí, která je umístěna nad Rozpakovem na potoce bez jména. Na obr. 27 je označen sedimentační kužel vytvořený na přítoku z levé strany. Na přítoku z pravé strany je vrstva sedimentu výrazně menší a to z důvodu, že vodní nádrž Srnčí, umístěna nad přítokem, působí jako tzv. sedimentační nádrž. Celkový pohled na profil nádrže značí, že je delší dobu bez větší údržby nebo odbahnění. Určený objem rybníka je 12 513 m<sup>3</sup> s RMSE 0,102 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	13795,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	12513,25
RMSE (m)	0,102
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-1281,75

Tabulka 2: Porovnání objemů Rozpakov (Autor práce, 2018)



Obrázek 27: Interpolace Rozpakov (Autor práce, 2018)



Obrázek 28: Charakteristika Rozpakov (Autor práce, 2018)

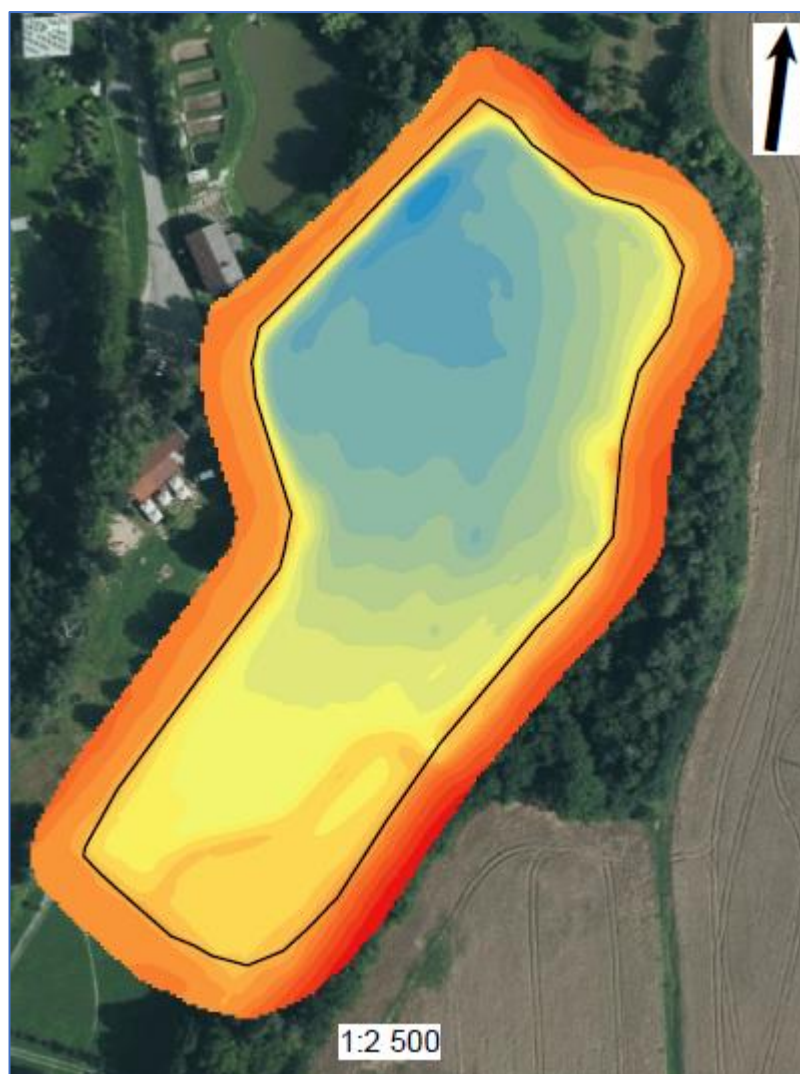
Marvánek je vodní nádrž, která slouží jako koupaliště. Na přítoku do nádrže je umístěna litorální zóna, která je oddělena od zbytku vodní plochy propustnou dělicí



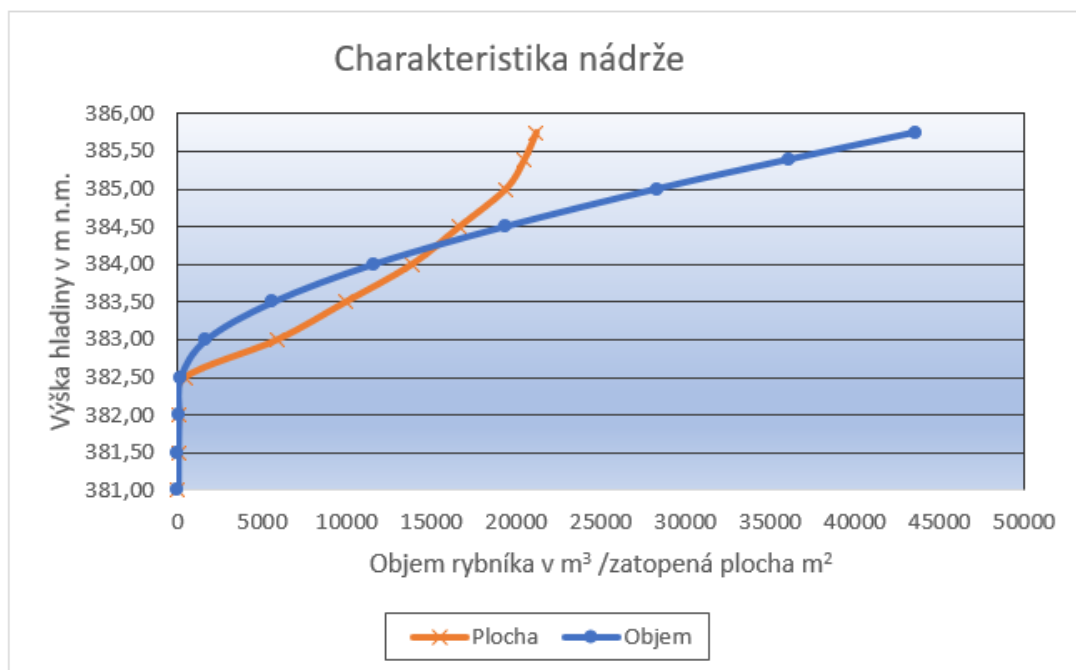
hrázkou, jak je vidět na obrázku 29. Nádrž prošla celkovou revitalizací, která byla dokončena začátkem roku 2017. Tento fakt přispěl k tomu, že rozdíl objemů z měření a manipulačního řádu je velice malý (tab. 3). Tato nádrž je vhodná k dalšímu měření a sledování, jak rychle dochází k zanášení sedimentem. Určený objem nádrže je 36 081,97 m<sup>3</sup> s RMSE 0,309 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	35909,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	36081,97
RMSE (m)	0,309
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	172,97

Tabulka 3: Porovnání objemů Marvánek (Autor práce, 2018)



Obrázek 29: Interpolace Marvánek (Autor práce, 2018)

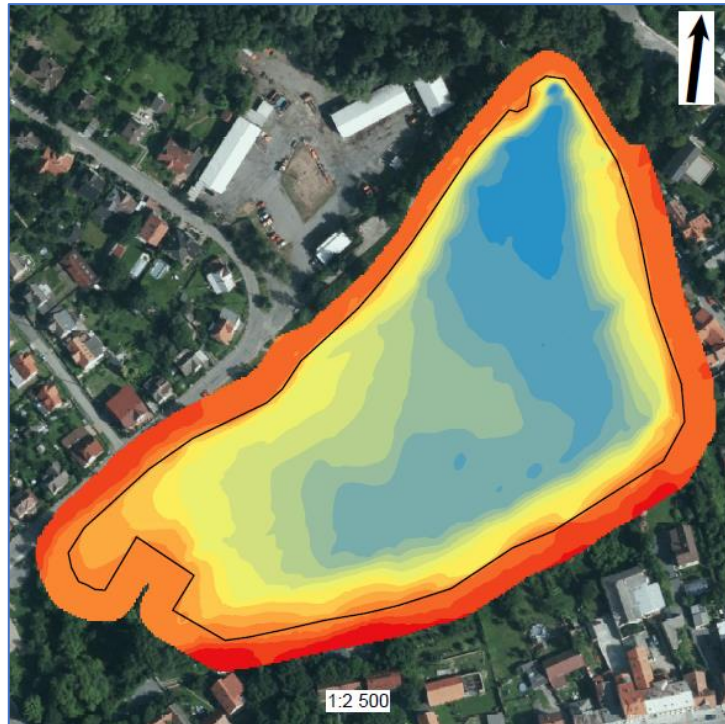


Obrázek 30: Charakteristika Marvánek (Autor práce, 2018)

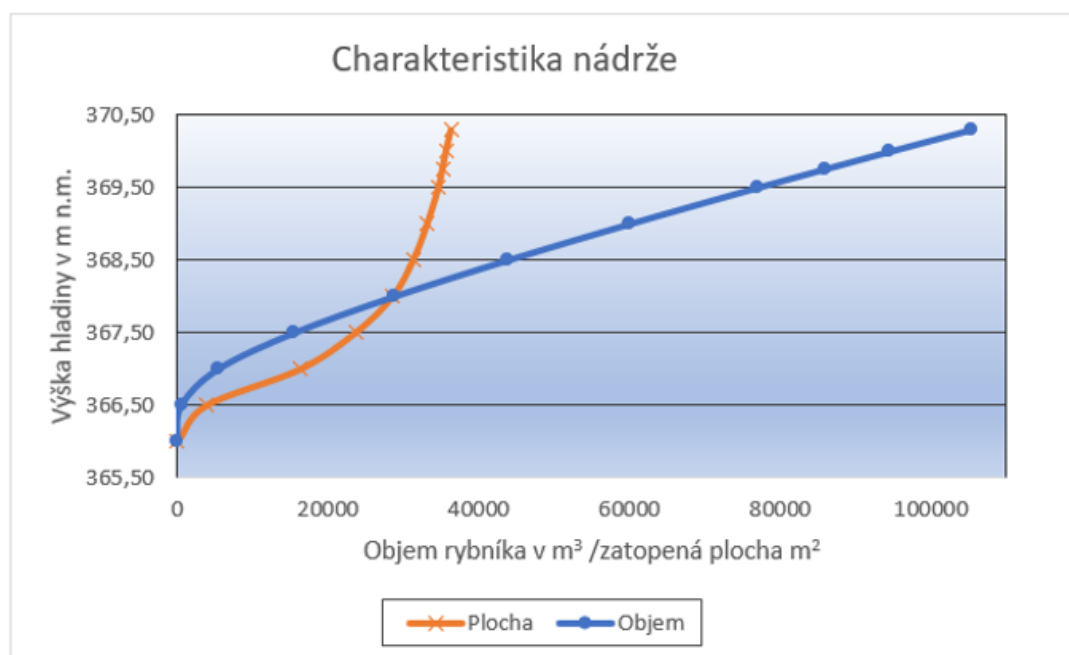
Mlýnský rybník se nachází v zástavbě města Říčany. Rybník prošel v roce 2015 celkovou rekonstrukcí. Jak je vidět na obrázku 31 dno bylo vyspárováno k pravé straně a dále k vypouštěcímu zařízení. Rozdíl v porovnání objemů ukazuje, že od rekonstrukce došlo k určitému zanešení sedimentem. Určený objem rybníku je 94 483,01 m<sup>3</sup> s chybou RMSE 0,219 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	99210,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	94483,01
RMSE (m)	0,219
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-4726,99

Tabulka 4: Porovnání objemů Mlýnský rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 31: Interpolace Mlýnský rybník (Autor práce, 2018)



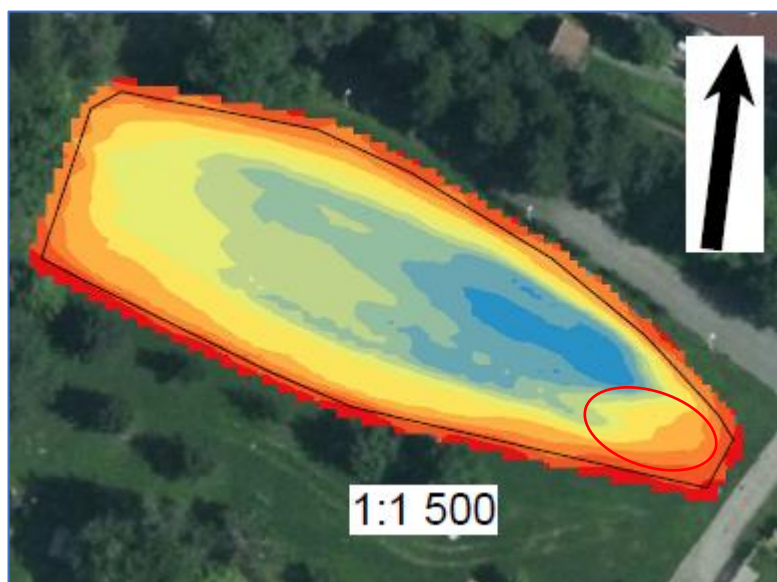
Obrázek 32: Charakteristika Mlýnský rybník (Autor práce, 2018)

Návesní rybník leží vedle Říčanského potoka. Je napájen přívodním potrubím z potoka. Na obrázku 33 je vyznačen sedimentační kužel, který se nachází na přítoku u potrubí. V nádrži se akumulují sedimenty, hlavně z toho důvodu, že nádrž nemá vypouštěcí zařízení. Při vypouštění musí být voda přečerpávána. Přirozený odtok je vyřešen přepadem do dešťové kanalizace, která se vlévá zpět do potoka. Určený

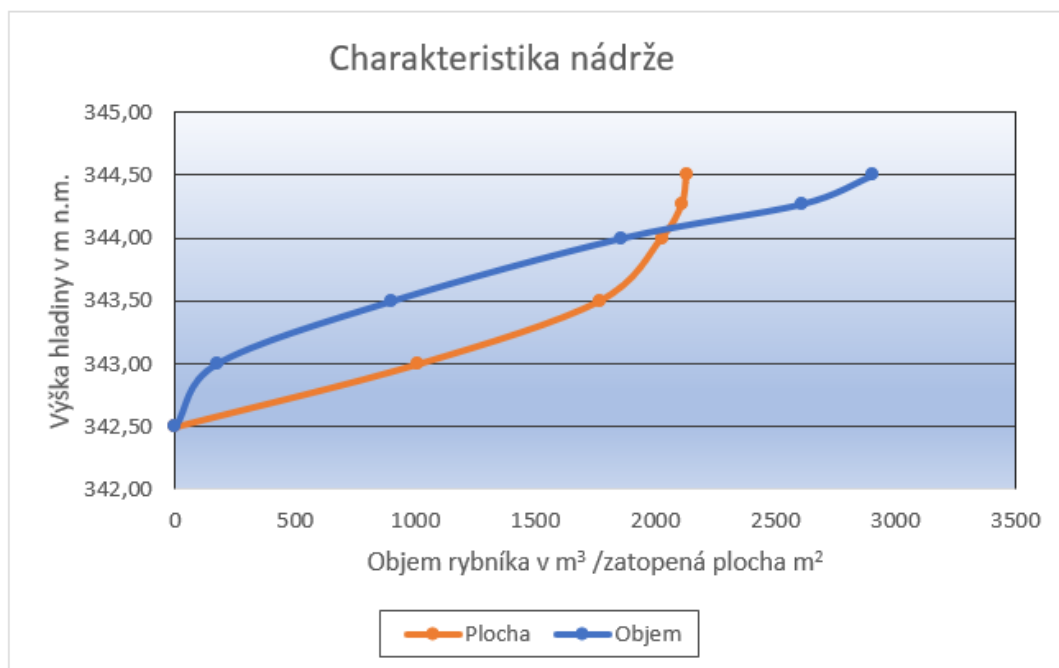
objem nádrže je 2 607,93 m<sup>3</sup> s RMSE 0,142 m. Z tabulky 5 je vidět, že objem nádrže se od odbahnění v roce 2009 snížil téměř o 250 m<sup>3</sup>.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	2850,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	2607,93
RMSE (m)	0,142
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-242,07

Tabulka 5: Porovnání objemů Návesní rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 33: Interpolace Návesní rybník (Autor práce, 2018)

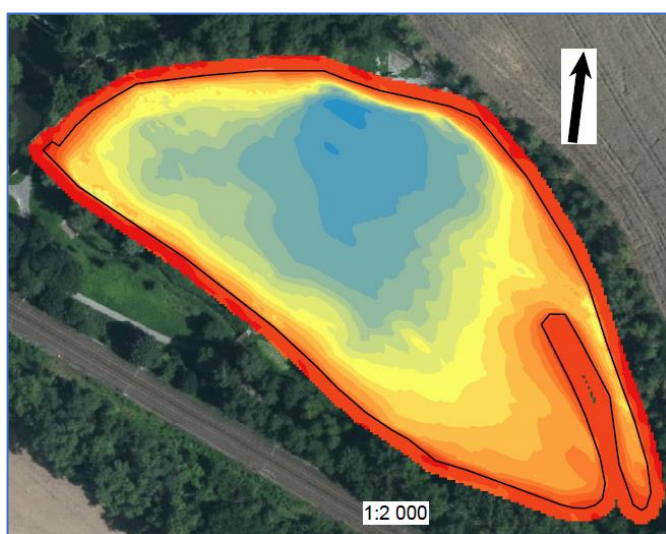


Obrázek 34: Charakteristika Návesní rybník (Autor práce, 2018)

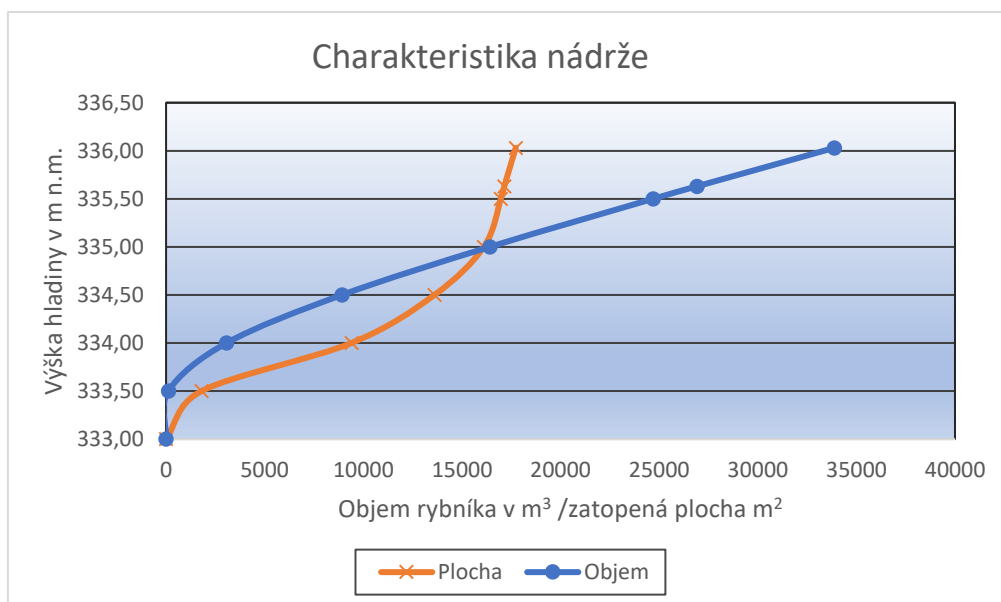
Vodice je první nádrž na soustavě tři nádrží blízko sebe ležících nádrží. Z obrázku 35 je zřejmé, že největší zatopená plocha je mezi kótami 333,50 a 334 m n. m.. Tím, že je nádrž obtočná nemusí docházet k velkému zanášení sedimentem. Objem nádrže je 26 917,09 m<sup>3</sup> s RMSE 0,186 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	31760,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	26917,09
RMSE (m)	0,186
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-4842,91

Tabulka 6: Porovnání objemů Vodice (Autor práce, 2018)



Obrázek 35: Interpolace Vodice (Autor práce, 2018)



Obrázek 36: Charakteristika Vodice (Autor práce, 2018)

Nadýmač I a II jsou na sebe navazující vodní nádrže, kdy voda z Nadýmače II přímo přepadá do Nadýmače I. U obou nádrží je velký rozdíl v porovnání určeného a získaného objemu z manipulačního řádu. Z obrázku 37 a 38 je vidět, že obě nádrže nejsou příliš hluboké. Na obrázku 36 je označen sedimentační nános u přítoku do Nadýmače II. Určený objem u Nadýmače I je 5263,32 m<sup>3</sup> s RMSE 0,179 m a u Nadýmače II je 1301,08 m<sup>3</sup> s RMSE 0,163 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	8500,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	5263,32
RMSE (m)	0,179
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-3236,68

Tabulka 7: Porovnání objemů Nadýmač I (Autor práce, 2018)

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	3000,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	1301,08
RMSE (m)	0,163
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-1698,92

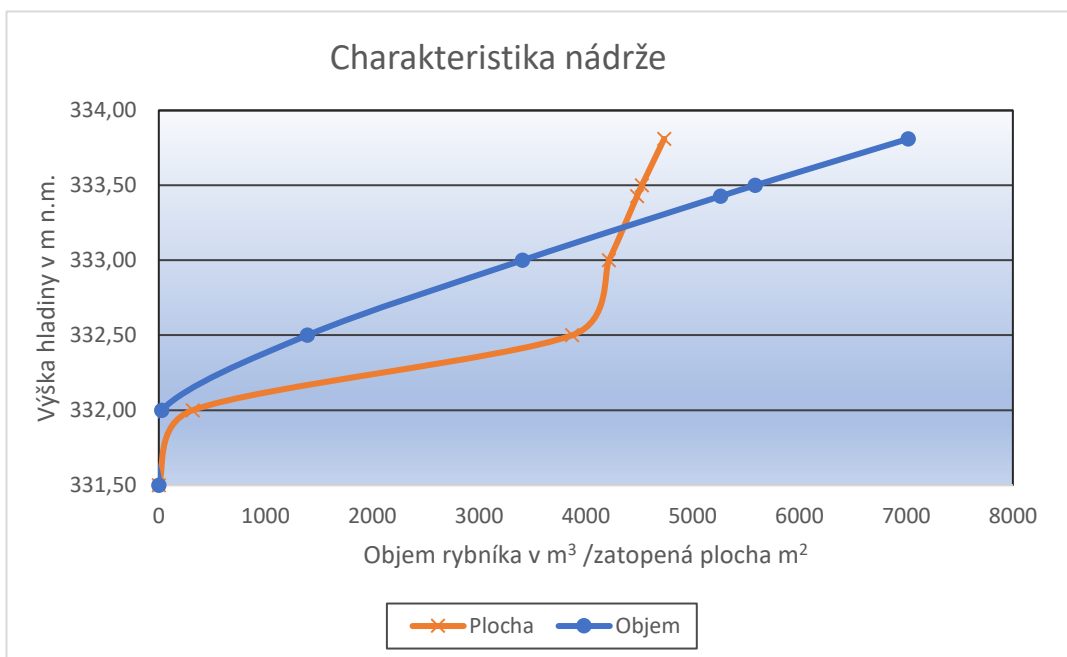
Tabulka 8: Porovnání objemů Nadýmač II (Autor práce, 2018)



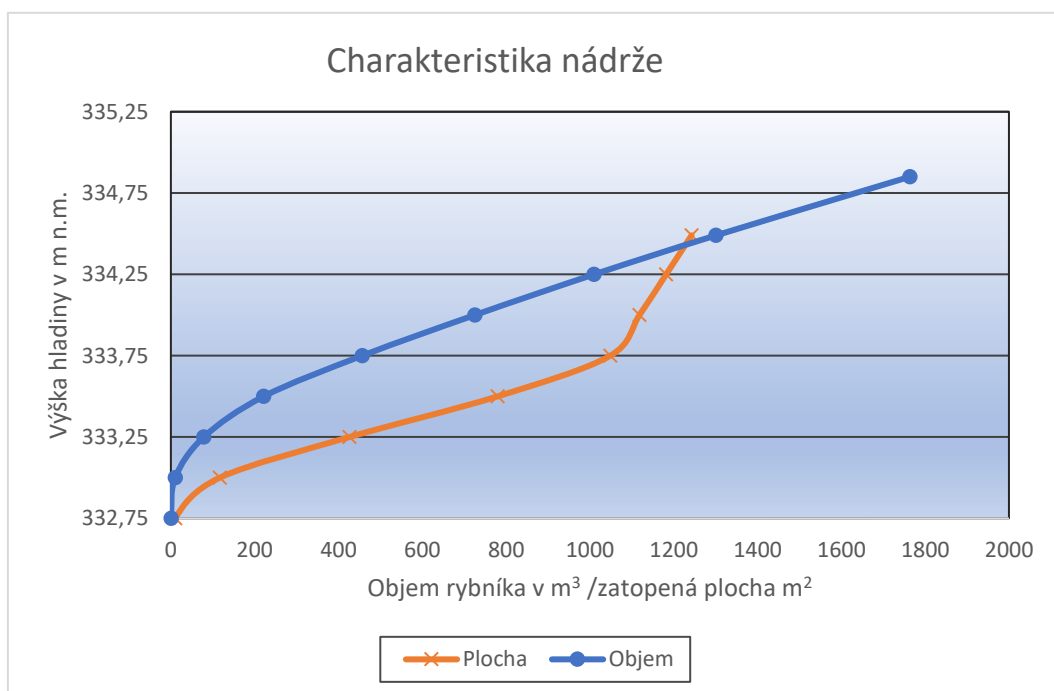
Obrázek 38: Interpolace Nadýmač I (Autor práce, 2018)



Obrázek 37: Interpolace Nadýmač II (Autor práce, 2018)



Obrázek 39: Charakteristika Nadýmač I (Autor práce, 2018)



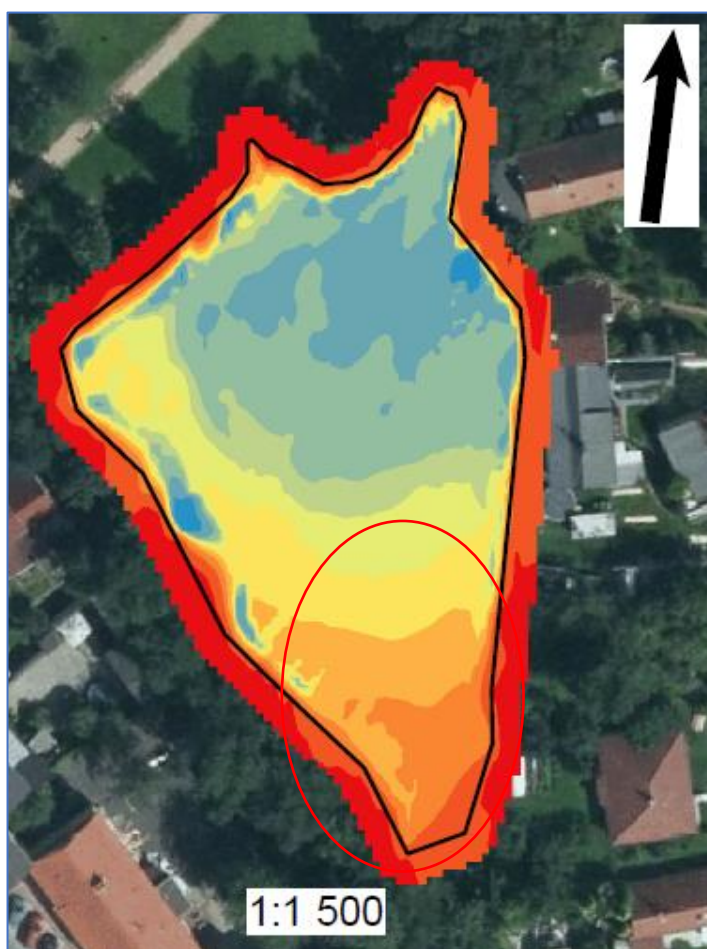
Obrázek 40: Charakteristika Nadýmač II (Autor práce, 2018)

Cukrovarský rybník je jeden z mála, který na Říčanské soustavě není revitalizován. Jeho revitalizace se připravuje na letošní rok. Na obrázku 41 je označen sedimentační kužel u přítoku do nádrže. Na levé straně nádrže se nachází mělčina, kde nemohlo dojít k optimálnímu získání dat, což se projevilo na výsledku. U

Cukrovarského rybníku nebyl získán manipulační řád, takže nemohl být porovnán objem. Jediné, co bylo zjištěno ze studie na revitalizaci je předpokládaný objem po opravě a odbahnění, který je 3300 m<sup>3</sup>. Určený objem nádrže je 2953,15 m<sup>3</sup> s RMSE 0,383 m.

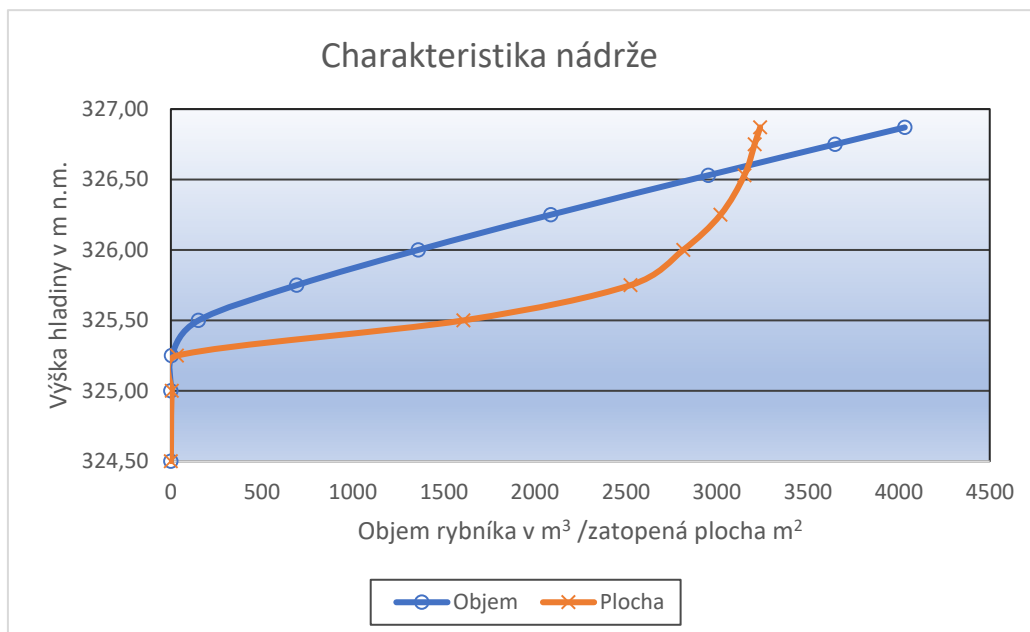
Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	nezjištěno
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	2953,15
RMSE (m)	0,383
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-

Tabulka 9: Porovnání objemů Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 41: Interpolace Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018)



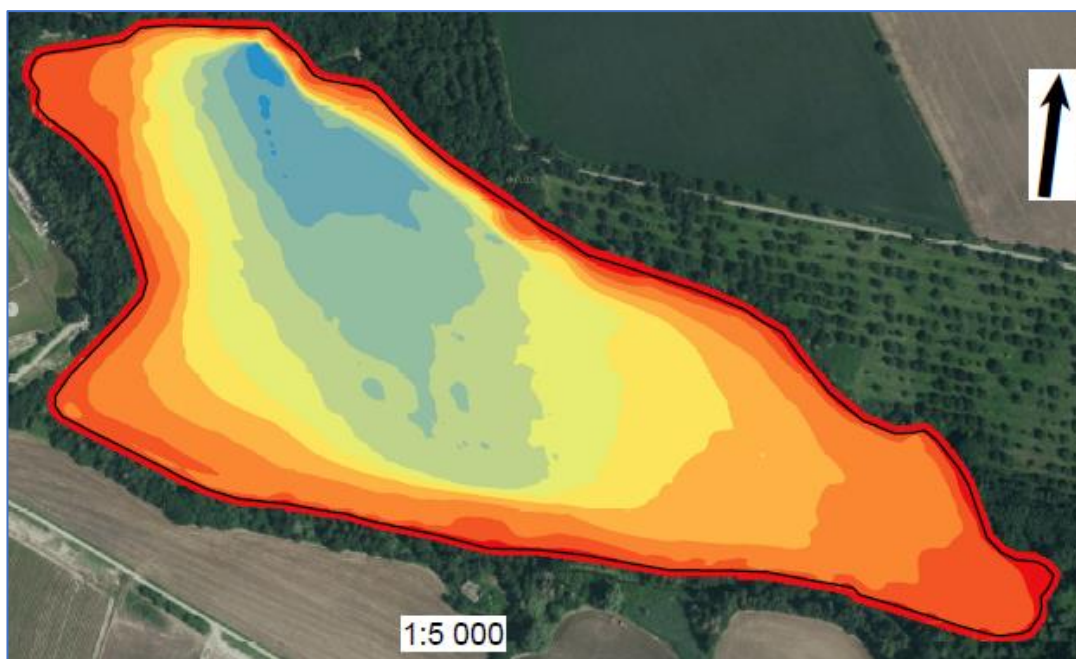


Obrázek 42: Charakteristika Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018)

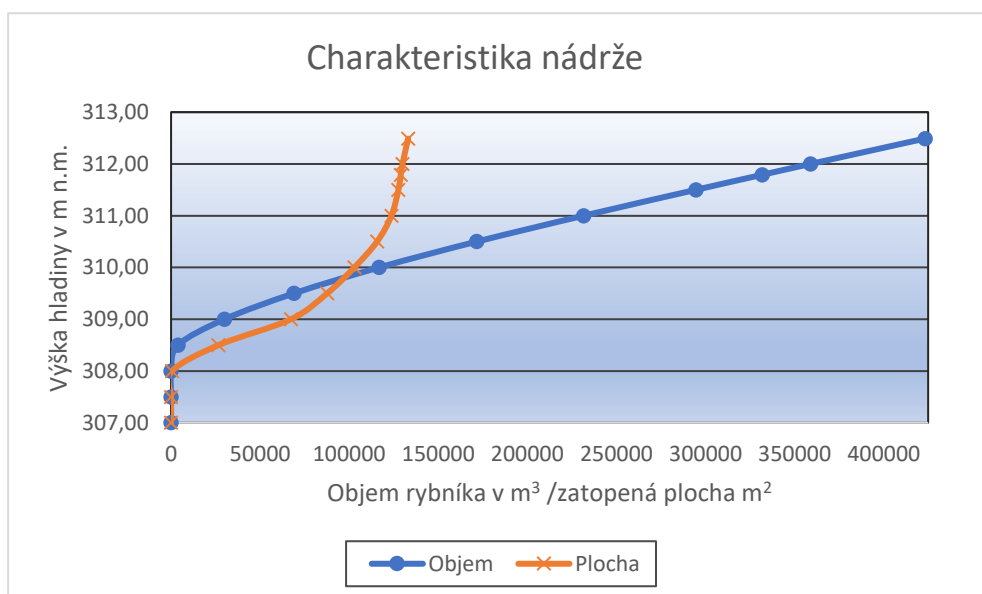
Podleský rybník je největší na Říčanském potoce. Velký rozdíl měřeného a získaného objemu z manipulačního řádu, může být způsoben určení objemu v manipulačního řádu nebo i jeho starším datem vydání. Na obrázku 43 je vidět, že v pravé části rybníka, u přítoku, je značně zanesen sedimentem. Určený objem nádrže je 331 783,81 m<sup>3</sup> s RMSE 0,181 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	310000,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	331783,81
RMSE (m)	0,181
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	21783,81

Tabulka 10: Porovnání objemů Podleský rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 43: Interpolace Podleský rybník (Autor práce, 2018)

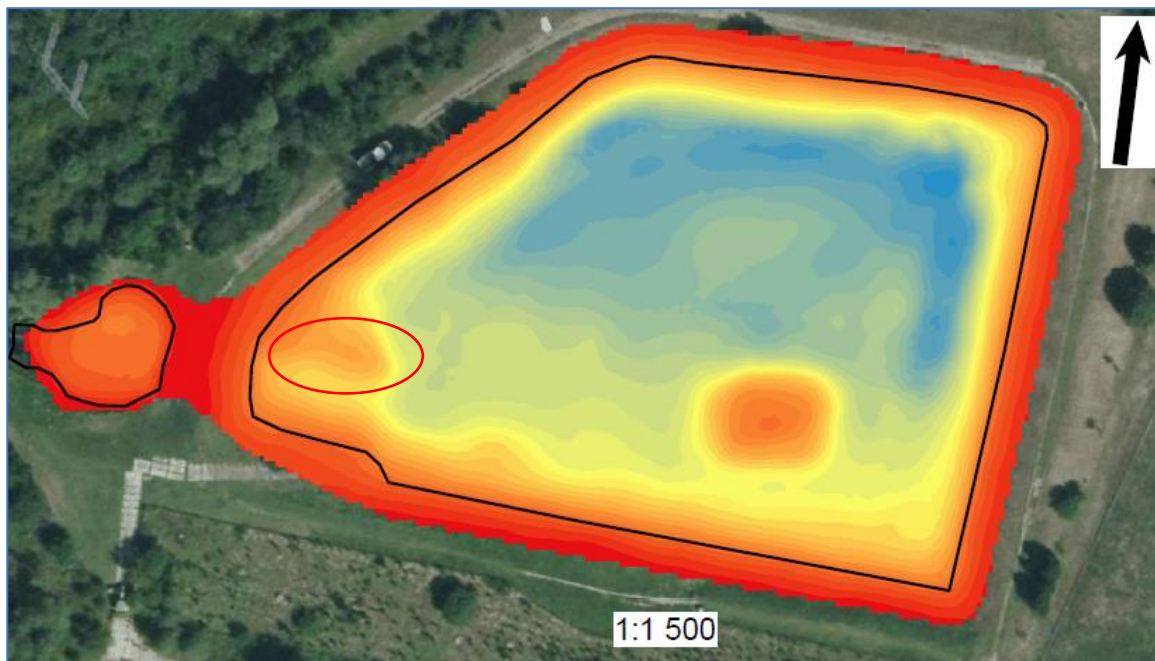


Obrázek 44: Charakteristika Podleský rybník (Autor práce, 2018)

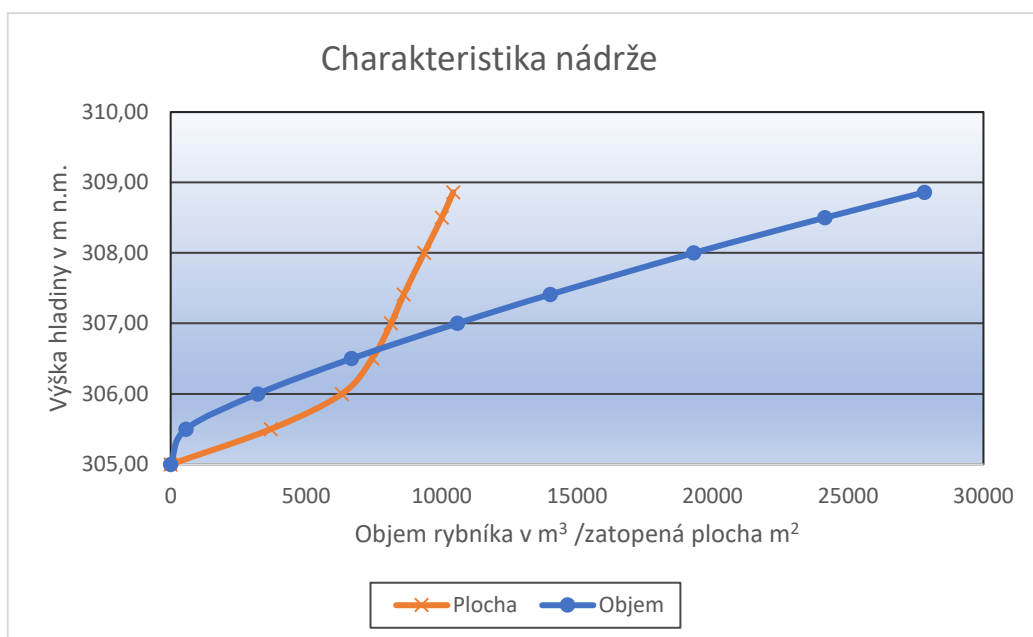
Retenční nádrž Říčanka slouží jako rezervoár pro dešťové vody z blízké zástavby. Neleží přímo na Říčanském potoce, ale byla zahrnuta do měření, jelikož se jedná o důležitý zdroj vody pro potok. Na obrázku 45 je zvýrazněn sedimentační kužel, který se vytváří na přítoku do nádrže, i když je před nádrží sedimentační jezírko. V nádrži se nachází uměle vytvořený ostrůvek. Určený objem nádrže je 14 006,75 m<sup>3</sup> s RMSE 0,194 m.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	14472,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	14006,75
RMSE (m)	0,194
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-465,25

Tabulka 11: Porovnání objemů Podleský rybník (Autor práce, 2018)



Obrázek 45: Interpolace retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2018)

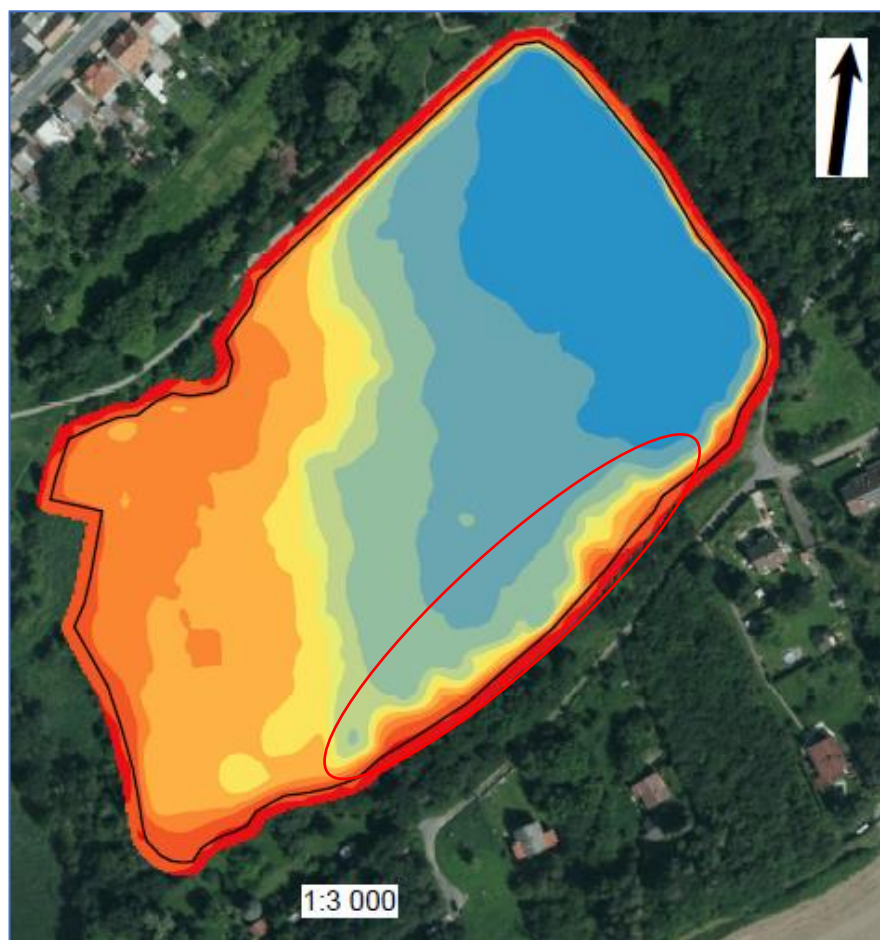


Obrázek 46: Charakteristika retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2018)

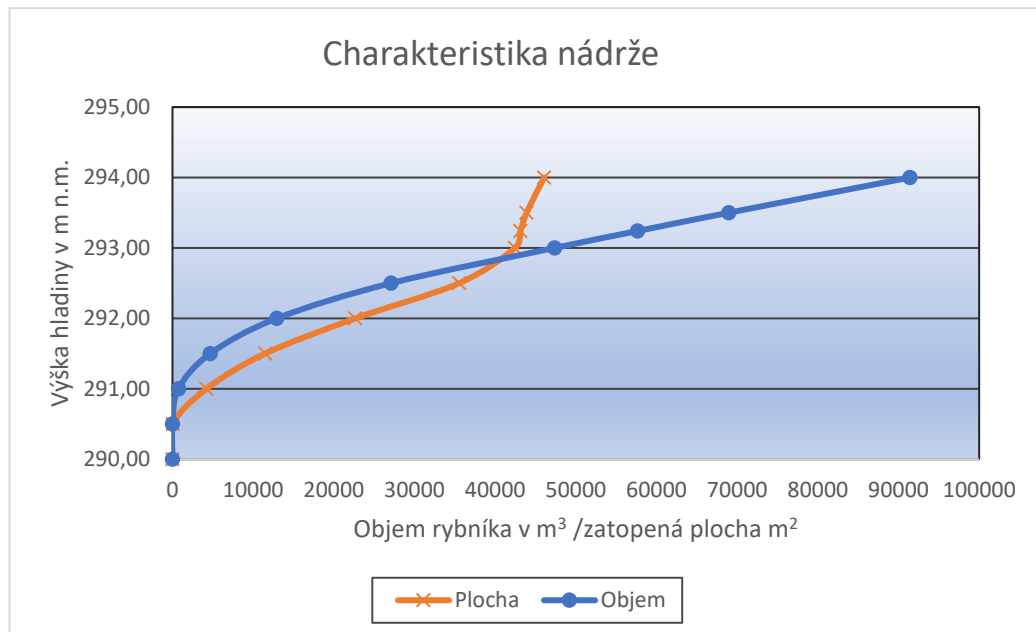
Vodní nádrž V Rohožníku byla v roce 2014 odbahněna. U naměřených dat se vyskytují místa, která nejsou dostatečně hustě zmapována, a v důsledku této nedokonalosti měření dochází k tomu, že interpolovaný povrch je zkreslen. Toto zkreslení je označeno na obrázku 47, kde došlo k nedostatečnému zaznamenání hloubek podél břehové hrany nádrže. V těchto místech dochází ke zkreslení DMT. Ve výsledku se to zobrazí jako obloukové výstupky směrem ke středu nádrže. Určený objem nádrže je 57 628,69 m<sup>3</sup> s RMSE 0,219 m<sup>2</sup>.

Objem z manipulačního řádu (m <sup>3</sup> )	61520,00
Objem určen z měření (m <sup>3</sup> )	57628,69
RMSE (m)	0,219
Rozdíl objemů (m <sup>3</sup> )	-3891,31

Tabulka 12: Porovnání objemů V Rohožníku (Autor práce, 2018)



Obrázek 47: Interpolace V Rohožníku (Autor práce, 2018)



Obrázek 48: Charakteristika V Rohožníku (Autor práce, 2018)

## 7 Diskuze

Jedna z možností, jak ověřit dosažené výsledky na jednotlivých nádržích by bylo provést další měření, ale jinou metodou např. geodetickou. Další možností je pak opětovné měření echosoundrem za pomoci kajaku, zde ale může docházet k rozdílu z důvodu neodhadnutí stejné trajektorie lodi a tím pádem k jinému uspořádání a hustotě dat. Tento problém by mohl být vyřešen např. pomocí natažení vodících lan, které by bylo ovšem velice časově i finančně náročné. Další možností je využití navigace podle GPS, která by určovala směr lodi například doplněním softwarového klíče (HydroSurveyor) pro měřící zařízení, které by umožnilo využít plánování pomocí mapy a kontrolu při měření. Při zpracování dat bylo zjištěno, že na některých nádržích jsou poměrně velké plochy, kde chybí data. V těchto místech může dojít ke zkreslení až do té míry, že výsledný model nemá správnou vypovídající hodnotu. Při měření z lodi je velmi obtížné odhadnout trasu pro ideální rozložení a hustotu naměřených dat. Je tedy otázkou, jak tento problém řešit v budoucnosti s ohledem na ideální sběr a rozložení dat. V diplomové práci jsou určené objemy porovnány s objemy v manipulačních řádech. Ovšem toto porovnání není příliš vypovídající, z důvodu nepřesnosti uváděných objemů v manipulačních řádech. Použitá metoda měření dat byla ověřena a porovnána v diplomové práci Tomáše Milaberského z roku 2016 „Referenční batymetrické měření na malé vodní nádrži Strnad v povodí Litovicko-Šáreckého potoka“. Práce se zabývá porovnáním měření pomocí echosounderu a

soutyčím. Z dosažených výsledků je možné konstatovat, že měření pomocí echosoundru udává relevantní výsledky. Použití akustické metody a přístroje RiverSurveyor M9 je oproti jiným metodám časově i finančně výhodné. Ke stejnému závěru došli i Pavel Novák a kol. v práci „Nové technologie batymetrie vodních toků a nádrží pro stanovení jejich zásobních kapacit a sledování množství a dynamiky sedimentů“.

Při zpracování dat a vytváření DMT dna nádrží byla použita interpolační metoda Universal Kriging. U metody Universal Kriging je velmi důležité prostorové rozložení a hustota vstupních dat. Je otázkou, jestli by u některých nádrží nebyla vhodnější jiná metoda interpolace např. IDW nebo Topo to Raster s ohledem na přesnost výsledného modelu. Nicméně porovnání interpolačních metod při množství naměřených dat je nad rámec této diplomové práce. V budoucnu by mohlo dojít k porovnání současně vytvářené diplomové práce „Batymetrie soustavy nádrží na Říčanském potoce“, kolegy Jana Burdy, který se podílel i na sběru dat. Ve své práci využívá stejná data, ale s použitím interpolační metody Spline with Tension. Porovnání výsledků by mohlo být zajímavé s ohledem na jednotlivé nádrže a jejich morfologii. Za úvahu by stálo i zlepšení metodiky zpracování dat v ArcGIS, nebo použití jiného softwaru. Při využití jiného způsobu zpracování je teoreticky možné, že by se podařilo dosáhnout větší přesnosti výsledných modelů.

## 8 Závěr

Předmětem diplomové práce bylo zjistit aktuální retenční kapacitu MVN na Říčanském potoce pomocí měření s přístrojem RiverSurveyor M9 a vytvoření DMT jednotlivých nádrží. Měření probíhalo v rozmezí přibližně půl roku. Zpracování bylo prováděno v programu ArcGIS. Pro tvorbu DMT nádrží byla předem určena interpolační metoda Universal Kriging. Určený celkový objem zadržené vody na Říčanské soustavě je 591 241,41 m<sup>3</sup>. Průměrná RMSE pro celou soustavu je 0,201 m. U Cukrovarského rybníka RMSE dosahuje hodnoty 0,383 m. Je to hlavně z důvodu mělké vody v některých částech, popadaných větvích a kolmých rozpadlých stěn na jedné straně rybníka. V těchto místech nemohlo dojít k zaměření a vstupní data do interpolační metody Universal Kriging nebyla optimální. Určené objemy jednotlivých nádrží byly porovnány s objemy z manipulačních řádů. U některých nádrží jsou rozdíly větší, hlavně z důvodu stáří manipulačních řádů, a ne úplně optimálnímu výpočtu objemu z ploch a bodového zaměření. Určitý podíl na rozdílech objemů má zanášení nádrží sedimentem, který zmenšuje retenční kapacitu nádrže a patří

k největším problémům MVN. Na DMT nádržích, hlavně u těch nerevitalizovaných a neudržovaných, jsou vidět sedimentační útvary na přítoku do nádrže. Tyto útvary jsou označeny na obrázku 27, 33, 37, 41 a 45. Při měření došlo k občasné chybě špatného rozložení a hustotě sběru dat. Chybu je možné vidět na výsledném modelu vodní nádrže V Rohožníku na obrázku 47. Na základě výsledku, lze konstatovat postupný trend zvyšování objemu sedimentů v MVN. . Přínosem této práce je, že změřená data mohou být využita pro modelování budoucích možných extrémů a jejich dopadu na povodí. Data také mohou sloužit jako referenční stav pro budoucí měření na soustavě kvůli sledování zásobních kapacit a množství a dynamiky sedimentů.

## 9 Literatura a použité zdroje

- Ali, M., Goovaerts, P., Nazia, N., Haq, M.Z., Yunus, M., Emch, M., 2006. Application of Poisson kriging to the mapping of cholera and dysentery incidence in an endemic area of Bangladesh. *Int. J. Health Geogr.* 5, 45.  
<https://doi.org/10.1186/1476-072X-5-45>
- Amante, C.; Eakins, B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009, 19
- Analysis, E.D., n.d. Metody prostorové interpolace 1–9.
- Auchincloss, A.H., Diez Roux, A. V., Brown, D.G., Raghunathan, T.E., Erdmann, C.A., 2007. Filling the gaps: Spatial interpolation of residential survey data in the estimation of neighborhood characteristics. *Epidemiology* 18, 469–478.  
<https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3180646320>
- Azis, A., Yusuf, H., Faisal, Z., Suradi, M., 2015. Water turbidity impact on discharge decrease of groundwater recharge in recharge reservoir. *Procedia Eng.* 125, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.029>
- Bagis, A., Karaboga, D., 2007. Evolutionary algorithm-based fuzzy PD control of spillway gates of dams. *J. Franklin Inst.* 344, 1039–1055.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2007.05.003>
- Bivand, R.S., Pebesma, E.J., Gomez-Rubio, V., 2008. Applied Spatial Data Analysis with R, Applied Spatial Data Analysis with R. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78171-6>
- Blicharska, M., Andersson, J., Bergsten, J., Bjelke, U., Hilding-Rydevik, T., Johansson, F., 2016. Effects of management intensity, function and vegetation on the biodiversity in urban ponds. *Urban For. Urban Green.* 20, 103–112.  
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.012>
- Briney, A., Danie Krige and Kriging. GIS LOUNGE (online). 24 February 2014. Online: <https://www.gislounge.com/danie-krige-kriging/>, cit. 21/3/2018.
- Costa, B.M., Battista, T.A., Pittman, S.J., 2009. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 113, 1082–1100.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.015>
- ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže. 2011. Český normalizační institut, Praha, 48 s.
- ČÚZK: Geoportál [WWW Document], n.d. URL [http://geoportal.cuzk.cz/WMS\\_ORTOFOTO\\_PUB/WMSservice.aspx?](http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx?) (accessed 2.5.18).
- De Vincenzo, A., Jacopo Molino, A., Molino, B., Scorpio, V., 2017. Reservoir rehabilitation: The new methodological approach of Economic Environmental Defence. *Int. J. Sediment Res.* 32, 288–294.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.05.007>
- DIBAVOD, 2015: Oddělení geografických informačních systémů a kartografie, Praha. Online: <http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&PHPSESSID=a99b61cefd21e6d164552fd394e9e854/>, cit. 15/2/2018.



- Dierssen, H.M., 2010. Perspectives on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 17073–17078. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913800107>
- Dierssen, H.M., Theberge, A.E., 2016a. Bathymetry: Assessment. *Encycl. Nat. Resour. Water* 629–636. <https://doi.org/10.1081/E-ENRW-120048588>
- Dierssen, H.M., Theberge, A.E., 2016b. Bathymetry: Seafloor Mapping History. *Encycl. Nat. Resour. Water* 644–648. <https://doi.org/10.1081/E-ENRW-120047531>
- Dierssen, H.M., Zimmerman, R.C., Leathers, R.A., Downes, T.V., Davis, C.O., 2003. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne imagery. *Limnol. Oceanogr.* 48, 444–455. [https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1\\_part\\_2.0444](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0444)
- Dumke, I., Nornes, S.M., Purser, A., Marcon, Y., Ludvigsen, M., Ellefmo, S.L., Johnsen, G., Søreide, F., 2018. First hyperspectral imaging survey of the deep seafloor: High-resolution mapping of manganese nodules. *Remote Sens. Environ.* 209, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.024>
- Ehsani, N., Vörösmarty, C.J., Fekete, B.M., Stakhiv, E.Z., 2017. Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *J. Hydrol.* 555, 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.008>
- Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J.E., Poussin, J.C., Cecchi, P., 2015. Water balance of small reservoirs in the volta basin: A case study of boura reservoir in burkina faso. *Agric. Water Manag.* 152, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006>
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V.P., Ouyang, W., Cheng, H., 2017. An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environ. Model. Softw.* 91, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.008>
- Hradilek, V., Bašta, P., Vizina, Š., Máca, P., Pech, P., 2015. Verification of remote sensing data for measuring bathymetry on small water reservoirs. *SGEM Proc.* 2015 1219–1226. <https://doi.org/10.5593/SGEM2015/B21/S10.155>
- Hradilek, V., Roub, R., Novák, P., Vybíral, T., Marval, Š., Hejduk, T., Hlaváček, J., Bureš, L., 2017. Technologie připevnění a stabilizace měřicí aparatury RiverSurveyor M9 na kajaku za účelem měření batymetrie malých vodních nádrží. Praha.
- Ježek, J., *Geostatistika a prostorová interpolace*. V Praze: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-3076-2.
- Jílek, J., *HYDRO – NATUR. Kolovraty-Revitalizace Návesního rybníka*, 2009.
- Kashani, A.G., Olsen, M.J., Parrish, C.E., Wilson, N., 2015. A review of LIDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors (Switzerland)* 15, 28099–28128. <https://doi.org/10.3390/s151128099>
- Khaba, L., Griffiths, J.A., 2017. Calculation of reservoir capacity loss due to sediment deposition in the `Muela reservoir, Northern Lesotho. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 5, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.005>
- Le, N.D., Zidek, J. V., 2006. *Statistical analysis of environmental space-time processes*. Springer.

- Lesy hl. m. Prahy. Manipulační řád pro vodní dílo retenční nádrž Říčanka, 2015.
- Lesy hl. m. Prahy. Manipulační řád pro vodní dílo rybník Rohožník, 2015.
- Li, Z., Lin, X., Coles, A.E., Chen, X., 2017. Catchment-scale surface water-groundwater connectivity on China's Loess Plateau. *Catena* 152, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.026>
- Liu, X., Chen, L., Zhu, Y., Singh, V.P., Qu, G., Guo, X., 2017. Multi-objective reservoir operation during flood season considering spillway optimization. *J. Hydrol.* 552, 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.044>
- Mayer, L., History of Bathymetry: Early Methods, 10 October 2016. Online: <http://larrymayer.net/author/larrymayer/>, cit. 08/03/2018.
- Město Říčany. Manipulační řád pro rybník Marvánek. 2017.
- Město Uhřetěves. Provozní a manipulační řád rybníční soustavy Vodice, Nadýmač I a Nadýmač II, 2010.
- Munzar, J., Franc, M., 2003. Winter thunderstorms in central Europe in the past and the present. *Atmos. Res.* 67–68, 501–515. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00062-0)
- NOAA. (National Ocean Service website), 2018: What is bathymetry? Online: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>, cit. 25/02/18.
- Novák, P., Roub, R., Hlaváček, J., Marval, Š., Hejduk, T., Bureš, L., Hradílek, V., Máca, P., Maxová, J., Ptáčnicková, L., Čuba, P., Vacek, M., 2017. Nové technologie batymetrie vodních toků a nádrží pro stanovení jejich zásobních kapacit a sledování množství a dynamiky sedimentů. Praha.
- Okolí Podleského rybníku • Praha Zelená [WWW Document], n.d. URL <http://www.prahazelena.cz/okoli-podleskeho-rybniku.html> (accessed 3.23.18).
- Pattanaik, A., Sahu, K., Bhutiyani, M.R., 2015. Estimation of Shallow Water Bathymetry Using IRS-Multispectral Imagery of Odisha Coast, India. *Aquat. Procedia* 4, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.024>
- Pavlica, Jan. Malé vodní nádrže a rybníky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- Pittman, S.J., Costa, B., Pittman, S.J., Costa, B., Wedding, L.M., 2013. Coral Reef Remote Sensing. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9292-2>
- Pouliou, T., Kanaroglou, P.S., Elliott, S.J., Pengelly, L.D., 2008. Assessing the health impacts of air pollution: a re-analysis of the Hamilton children's cohort data using a spatial analytic approach. *Int. J. Environ. Health Res.* 18, 17–35. <https://doi.org/10.1080/09603120701844290>
- Prášek, A., Podklad pro projekt odbahnění rybníku Panský, 2017.
- Quadros, N.D., 2017. Technology in focus: Bathymetric lidar. *Hydro Int.* 21, 38–39.
- Rekonstrukce Mlýnského rybníka v Říčanech potvrdila havarijní stav hráze - ŘÍČANY (oficiální stránky města) [WWW Document], 2015. URL <https://info.ricany.cz/mesto/rekonstrukce-mlynskeho-rybnika-v-ricanech-potvrdila-havarijni-stav-hraze> (accessed 3.21.18).
- Růžička, M., Cukrovarský rybník-odbahnění, revitalizace, 2017.
- Sedláček, F., Manipulační řád pro rybník Podleský, 2004.

- Shields, F.D., Rigby, J.R., 2005. River habitat quality from river velocities measured using Acoustic Doppler current profiler. *Environ. Manage.* 36, 565–575. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0292-6>
- Smith, W., Sandwell, D., 2004. Conventional Bathymetry, Bathymetry from Space, and Geodetic Altimetry. *Oceanography* 17, 8–23. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.63>
- SonTek YSI, 2010. RiverSurveyor S5/M9 System Manual 115.
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Bejarano, M.D., Castillo, L.G., 2013. Extreme flood abatement in large dams with gate-controlled spillways. *J. Hydrol.* 498, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.010>
- Stagge, J.H., Kohn, I., Tallaksen, L.M., Stahl, K., 2015. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *J. Hydrol.* 530, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.039>
- Šálek, J., Malé vodní nádrže v životním prostředí : Svazek 27. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava; Ministerstvo životního prostředí ČR; Centrum pro otázky životního prostředí, 1996. 141 s. ISBN 80-7078-370-2.
- Šedivý, V., Vrána, K., Vodní hospodářství: hydraulika, malé vodní nádrže, revitalizace krajiny. Vyd. 1. Vodňany: Střední rybářská škola a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, 2011. 235 s. ISBN 9788087096147.
- Teledyne, Gordon, R.L., 2011. Acoustic Doppler Current Profiler principles of operation a practical primer 0, 1–52.
- VODNÍ DÍLA – TBD a.s. Manipulační a provozní řád rybníka Rozpakov, 2015.
- Vrána, K., Beran, J., Rybníky a účelové nádrže. Vyd. 3. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-04002-7.
- VTEI, n.d. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace VTEI [WWW Document]. URL <https://www.vtei.cz/2017/08/potencial-aplikace-prirode-blizkych-opatreni-pro-zadrzeni-vody-v-krajine-a-zlepseni-ekologickeho-stavu-vodnich-utvaru/> (accessed 3.13.18).
- Waller, Lance A., and Carol A. Gotway. Applied spatial statistics for public health data. Vol. 368. John Wiley & Sons, 2004.
- WHOI (Woods hole Oceanographic institution), 2018: Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Online: <https://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=819>, cit. 19/03/18.
- Wilke, Jerry J. Bathymetry Techniques and a Study of Little Sand Bay Harbor in Lake Superior, WI [online]. University of Wisconsin –Madison, 2007. Online: [http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE514\\_Coastal\\_Engineering/2007\\_Students\\_web/WilkeJ\\_CEE514\\_Bathymetry\\_files/Page434.htm](http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE514_Coastal_Engineering/2007_Students_web/WilkeJ_CEE514_Bathymetry_files/Page434.htm), cit. 28/02/2018.
- Worldatlas. (World Atlas with links to maps of countries, states, and regions, and find a geography guide & facts), 2018: What is Bathymetry? Online: <https://www.worldatlas.com/articles/what-is-bathymetry.html>, cit. 30/01/2018.

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Metoda dálkového průzkumu LiDAR (Kashani et al., 2015) .....	19
Obrázek 2: Radarová metoda měření batymetrie (Smith and Sandwell, 2004) .....	20
Obrázek 3: Porovnání pokrytí dna dosažené různými metodami průzkumu (Dierssen and Theberge, 2016a) .....	22
Obrázek 4: Dopplerův posun, (A) směrem k částicím, (B) po odrazu směrem zpět (Teledyne and Gordon, 2011) .....	23
Obrázek 5: (a) Lineární semi-variogram; (b) sférický semi-variogram; (c) exponenciální semi-variogram; a (d) power semi-variogram (Pouliou et al., 2008) ..	25
Obrázek 6: (a) Lineární semi-variogram; (b) sférický semi-variogram; (c) exponenciální semi-variogram; a (d) power semi-variogram (Pouliou et al., 2008) ..	26
Obrázek 7: Horní část povodí Říčanského potoka se zobrazením vodních nádrží (Dibavod, 2018) .....	29
Obrázek 8: Dolní část povodí Říčanského potoka se zobrazením vodních nádrží (Dibavod, 2018) .....	30
Obrázek 9: Panský rybník (Autor práce, 2018) .....	31
Obrázek 10: Rybník Rozpakov (Autor práce, 2017) .....	32
Obrázek 11: Rybník Marvánek (Autor práce, 2018) .....	33
Obrázek 12: Mlýnský rybník (Autor práce, 2017) .....	34
Obrázek 13: Návesní rybník (Autor práce, 2018) .....	35
Obrázek 14: Vodice (Autor práce, 2018) .....	36
Obrázek 15: Nadýmač II (Autor práce, 2018) .....	36
Obrázek 16: Nadýmač I (Autor práce, 2018) .....	37
Obrázek 17: Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018) .....	38
Obrázek 18: Podleský rybník (Autor práce, 2017) .....	39
Obrázek 19: Jezírko umístěné na vtoku do nádrže Říčanka. (Autor práce, 2017) ...	40
Obrázek 20: Retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2017) .....	40
Obrázek 21: Rybník V Rohožníku (Autor práce, 2017) .....	41
Obrázek 22: Tělo sonaru přístroje RiverSurveyor M9 (SonTek YSI, 2010) .....	42
Obrázek 23: Připevnění a stabilizace měřicí aparatury RiverSurveyor M9 na kajaku (Hradilek et al., 2017) .....	43
Obrázek 24: Měření pomocí aparatury RiverSurveyor M9 na kajaku (Autor práce, 2017) .....	44
Obrázek 25: Interpolace Panský rybník (Autor práce, 2018) .....	46
Obrázek 26: Charakteristika Panský rybník (Autor práce, 2018) .....	46
Obrázek 27: Interpolace Rozpakov (Autor práce, 2018) .....	47

Obrázek 28: Charakteristika Rozpakov (Autor práce, 2018) .....	47
Obrázek 29: Interpolace Marvánek (Autor práce, 2018).....	48
Obrázek 30: Charakteristika Marvánek (Autor práce, 2018).....	49
Obrázek 31: Interpolace Mlýnský rybník (Autor práce, 2018).....	50
Obrázek 32: Charakteristika Mlýnský rybník (Autor práce, 2018).....	50
Obrázek 33: Interpolace Návesní rybník (Autor práce, 2018).....	51
Obrázek 34: Charakteristika Návesní rybník (Autor práce, 2018).....	51
Obrázek 35: Interpolace Vodice (Autor práce, 2018) .....	52
Obrázek 36: Charakteristika Vodice (Autor práce, 2018) .....	52
Obrázek 37: Interpolace Nadýmač II (Autor práce, 2018) .....	53
Obrázek 38: Interpolace Nadýmač I (Autor práce, 2018) .....	53
Obrázek 39: Charakteristika Nadýmač I (Autor práce, 2018) .....	54
Obrázek 40: Charakteristika Nadýmač II (Autor práce, 2018) .....	54
Obrázek 41: Interpolace Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018) .....	55
Obrázek 42: Charakteristika Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018).....	56
Obrázek 43: Interpolace Podleský rybník (Autor práce, 2018) .....	57
Obrázek 44: Charakteristika Podleský rybník (Autor práce, 2018) .....	57
Obrázek 45: Interpolace retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2018).....	58
Obrázek 46: Charakteristika retenční nádrž Říčanka (Autor práce, 2018).....	58
Obrázek 47: Interpolace V Rohožníku (Autor práce, 2018) .....	59
Obrázek 48: Charakteristika V Rohožníku (Autor práce, 2018).....	60

## 11 Seznam tabulek

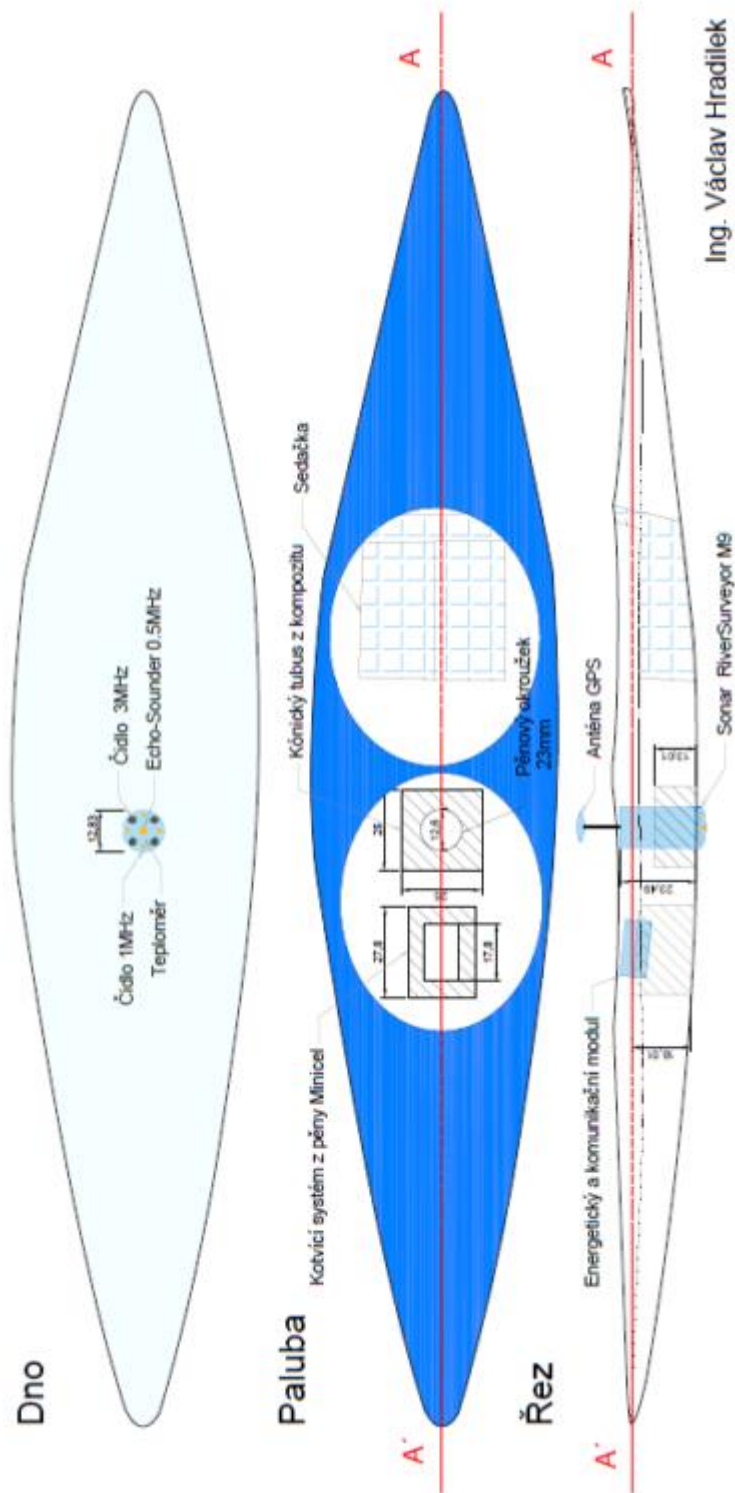
Tabulka 1: Porovnání objemů Panský rybník (Autor práce, 2018).....	45
Tabulka 2: Porovnání objemů Rozpakov (Autor práce, 2018) .....	47
Tabulka 3: Porovnání objemů Marvánek (Autor práce, 2018) .....	48
Tabulka 4: Porovnání objemů Mlýnský rybník (Autor práce, 2018) .....	49
Tabulka 5: Porovnání objemů Návesní rybník (Autor práce, 2018) .....	51
Tabulka 6: Porovnání objemů Vodice (Autor práce, 2018).....	52
Tabulka 7: Porovnání objemů Nadýmač I (Autor práce, 2018).....	53
Tabulka 8: Porovnání objemů Nadýmač II (Autor práce, 2018).....	53
Tabulka 9: Porovnání objemů Cukrovarský rybník (Autor práce, 2018).....	55
Tabulka 10: Porovnání objemů Podleský rybník (Autor práce, 2018).....	56
Tabulka 11: Porovnání objemů Podleský rybník (Autor práce, 2018).....	58
Tabulka 12: Porovnání objemů V Rohožníku (Autor práce, 2018).....	59

## 12 Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet váhy bodu u Kriginga (Ali et al., 2006).....27

## 13 Přílohy

### Kajak pro batymetrická měření



Příloha 1: Schéma nosného plavidla (V. Hradilek)



Příloha 2: Měření na vodní nádrži Marvánek (vlastní)



Příloha 3: RTK stanice (vlastní)