

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



BATYMETRIE VD NĚMČICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomant: Bc. Jan Prchal

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jan Prchal

Voda v krajině

Název práce

Batymetrie VD Němčice

Název anglicky

The Bathymetry of Němčice reservoir

Cíle práce

Cílem diplomové práce je odhad batymetrie vodního díla Němčice v povodí Sedlického potoka.

Metodika

Při odhadu batymetrie VD Němčice:

1. Použijte pro získání bodové informace o batymetrii přístroj Sontech River Surveyor M9
2. Proveďte analýzu nastavení měřicího přístroje
3. Proveďte analýzu vhodných interpolačních postupů, které jsou použity pro odhad batymetrie
4. Zhodnoťte vliv rozlišení dat na odhad akumulčního objemu nádrže
5. Stručně zhodnoťte režim sedimentů

Doporučený rozsah práce

standardní

Klíčová slova

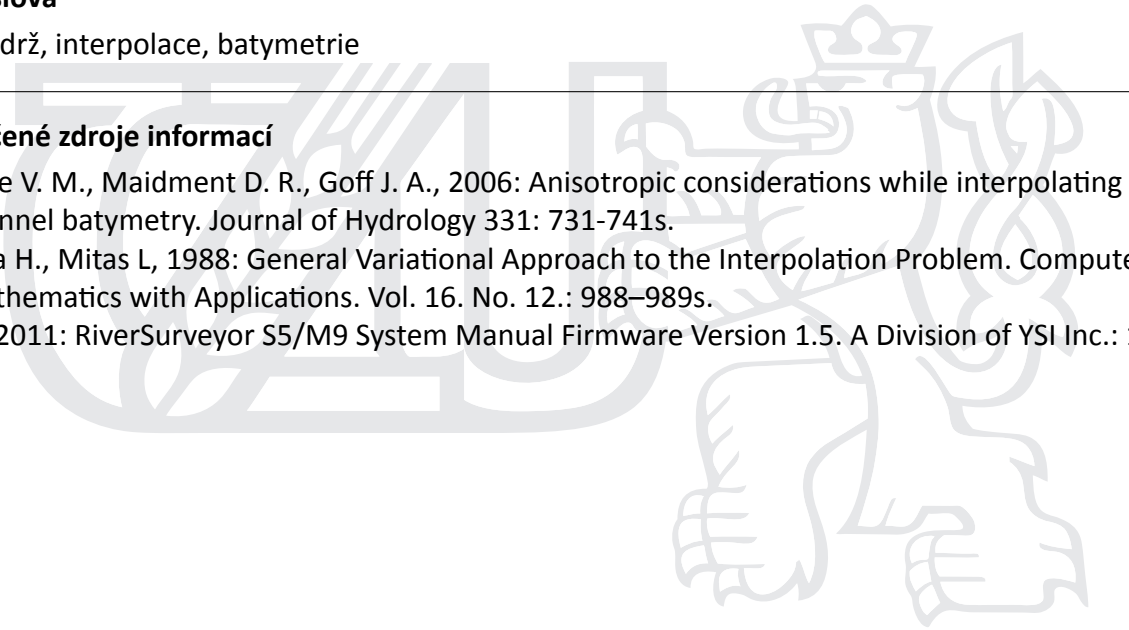
vodní nádrž, interpolace, batymetrie

Doporučené zdroje informací

Merwade V. M., Maidment D. R., Goff J. A., 2006: Anisotropic considerations while interpolating river channel batymetry. *Journal of Hydrology* 331: 731-741s.

Mitasova H., Mitas L, 1988: General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Computer and Mathematics with Applications*. Vol. 16. No. 12.: 988–989s.

SonTec, 2011: RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 1.5. A Division of YSI Inc.: 141s.



Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2016

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Máci, Ph.D. Další informace mi poskytl Ing. Václav Hradílek. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Praze 2016

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce, panu docentu Petru Mácovi, za velmi cenné rady, trpělivost a ochotu. Dále panu Ing. Václavu Hradílkovi a panu Ing. Petru Baštovi za cenné rady, přípravu na měření a pomoc s jeho realizací. A velké díky patří Bc. Haně Prchalové, Ing. Lucii Prchalové, Bc. Petře Tyšerové a celé rodině za podporu, trpělivost, porozumění a velkou motivaci během studií.

V Praze 2016

.....

Abstrakt

Batymetrie VD Němčice

Batymetrická měření jsou významná pro mapování reliéfu současných vodních nádrží a toků. Z důvodu nedostatku podobných měření na území České republiky je předložena diplomová práce zaměřena na realizaci prvního batymetrického průzkumu na vodní nádrži Němčice ležící na povodí Sedlického potoka. V rámci práce byl proveden sběr batymetrických dat přístrojem River Surveyor M9, zpracování dat interpolačními postupy a vyhodnocení se vzájemným porovnáním výsledků odhadů. Dále byl posuzován vliv rozlišení na retenční objem nádrže a také její režim sedimentů. Na základě vyhodnocení všech měření vychází jako průměrně nejméně chybová metoda Universal Kriging. Zpracována byla data měřená během roku 2015. Výsledek práce může sloužit i jako určitý návod pro následná měření a odhady batymetrických dat na podobných malých vodních nádržích v povodích České republiky.

Klíčová slova: vodní nádrž, interpolace, batymetrie

Abstract

The Bathymetry of Němĉice reservoir

Bathymetric measurements are important for mapping relief of current reservoirs and streams. Due to the lack of similar measurements in the Czech Republic is presented diploma thesis focused on the implementation of the first bathymetric survey on the water reservoir located on the basin Němĉice - Sedlický stream. As a part of the work was done bathymetric data collection device River Surveyor M9 data processing interpolation procedures and evaluate the mutual comparison of estimation results. It was also evaluated the effect of the resolution to the retention volume of the tank and its sedimentations regime. Based on the evaluation of the measurement is based on a minimum average error method Universal Kriging. Processed data were measured during the year 2015. The result of the work can serve as a guide for subsequent measurements and estimates bathymetric data on a similar small reservoirs in the catchment areas of the Czech Republic.

Key words: water reservoir, interpolation, bathymetri

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Cíle diplomové práce	12
3.	Struktura diplomové práce	13
4.	Metody	14
4.1.	Interpolační metody	14
4.1.1.	IDW	15
4.1.2.	KRIGING.....	17
4.1.3.	THIESSEN POLYGONS	20
4.1.4.	NATURAL NEIGHBOR.....	21
4.1.5.	SPLINE	22
4.1.6.	TIN	23
4.2.	Popis lokality.....	25
4.3.	Technologie sběru batymetrických dat	28
4.3.1.	Data	30
4.3.2.	Chyby dat	31
4.3.3.	RMSE.....	33
4.3.4.	MAE.....	33
5.	Výsledky	34
5.1.	Preprocessing dat	34
5.2.	Kontrolní data.....	42
5.3.	Nastavení interpolačních metod.....	45
5.4.	Vyhodnocení chyb	47
5.5.	Analýza vybrané metody.....	54
5.6.	Analýza objemů a ploch.....	61
5.7.	Vliv zanášení nádrže	63
6.	Diskuze.....	65
7.	Závěr	67
8.	Přehled literatury a použitých zdrojů	69
9.	Přílohy.....	73

1. Úvod

Z hydrologického hlediska je Česká republika nazývána „Střechou Evropy“ a to díky tomu, že prakticky všechna povrchová voda je z našeho území odváděna stěžejními toky do tří povodí Labe, Odry a Dunaje. Díky tomuto faktu je naše území velice závislé na množství dešťových srážek (Kovář 2014, Punčochář 2007). Je tedy nezbytně nutné s vodou nakládat pečlivě dle uvážení a udržovat určitý vodní režim v krajině. Problematika současného vodního režimu krajiny podléhá vlivům klimatickým (sucho, povodně) a vlivům antropogenním (například zástavba území, změna využívání krajiny, těžební činnost, intenzifikace zemědělství).

Ukazatelem sucha jsou například extrémní počasí v posledních letech, vysoké maximální hodnoty teplot vzduchu, výskyt holomrazů, přívalové deště, bezdeštná období, úbytek sněhové pokrývky a stále častější výskyt půdního sucha (Rožnovský 2012). Například v září loňského roku 2015 spadlo na území ČR pouze 60% srážkového normálu, byl značný výskyt řek s průtokem nižším než 335d (Daňhelka a kol. 2015). Antropogenní vliv má za následek snížení doby zdržení vody v povodí, zanášení nádrží a koryt řek - zmenšení průtočného profilu, zhoršení kvality vody, napřimování toků. Zásadními kroky při prevenci proti snižování retence vody v krajině jsou dokonalejší zpracování strategických hydrologických podkladů s ohledem na extrémní stavy, systematickosti meteorologických a hydrologických měření a rozvoj vzdělávacích programů s danou problematikou (Rožnovský 2014). Jednou z hydrologických strategií pro přizpůsobení se klimatickým změnám je obecné adaptační opatření vodního režimu krajiny. Cílem tohoto opatření je stabilizovat vodní režim krajiny posílením vodních zdrojů, jejich údržbou a efektivním využíváním (MŽP 2015). Adaptačním opatřením mohou být například malé vodní nádrže.

Malé vodní nádrže (MVN) jsou nedílným prvkem krajiny, který napomáhá k vývoji životního prostředí. Plní mnoho funkcí, jako například akumulaci, zásobní, vyrovnávací, ochrannou, vsakovací a čistící (Milerski 2004, Beran a Vrána 1998). Pro všechny funkce MVN je důležitý akumulaciční objem nádrže. Jde o významnou informaci z hlediska provozu nádrže a distribuce vody. Správný způsob hospodaření s vodou na povodí velmi přispívá k celkovému zlepšení vodního režimu krajiny

(MŽP 2015). Zjištění akumulčního objemu nádrže je v současnosti realizováno díky batymetrickým průzkumům za využití moderních technologií.

Batymetrický průzkum dna má své kořeny již v historii u námořnictva, kdy bylo zapotřebí zmapovat dno pro možnost lodní dopravy a později k válečným účelům (Pokorná 2007). Batymetrie u MVN je realizována především pro získání informací o tvaru a členitosti dna. Dále lze pomocí batymetrického průzkumu zjistit režim sedimentů, který ovlivňuje velikost akumulčního objemu nádrže. U většiny malých vodních nádrží na území České republiky v současné době nejsou k dispozici žádná batymetrická data.

Díky přístupu k moderním technologiím umožňujícím provádět batymetrická měření na MVN velmi rychle a přesně, je velikou výzvou realizovat průzkum nádrží na území ČR. Batymetrický průzkum ve větším měřítku využívá například státní podnik Povodí. Pro účely měření mají k dispozici jednu měřicí loď „Valentýnu II“ a měřicí člun „Joska“ (Příloha Obrázek 41 a Obrázek 42).

Valentýna II je primárně užívána pro monitoring Labsko Vltavské vodní cesty. Původně remorkér TR 610 je od roku 1999 po obou stranách opatřen sklopnými rameny nesoucími ultrazvuková měřicí čidla. Sběr a zpracování dat ve formátu X, Y, Z obstarává zařízení MD300 od finské společnosti Meridata Ltd Lohja. Zařízení provádí spolehlivá měření od hloubky 1,4m až do účinného dosahu 200m, jedná se tedy o přístroj určený primárně pro mělké vody. Výrobce udávaná chyba měření je +/- 4cm (Povodí Vltavy s. p. 2010). Výstupem jsou vrstevnicové mapy různých měřítek a to do 1 až 2 hodin po ukončení měření.

Joska je menší mobilní laminátový člun, určený pro mapování vodních toků, nádrží a jezer. Jedná se o typ Quicksilver 650. Je přepravována na podvalu taženém autem. Je osazen ultrazvukovým měřicím paprskem MD500, taktéž od firmy Meridata Ltd Lohja. Díky své velikosti je možné jeho využití na menších prostorech. Rozsah snímání hloubky je v rozsahu od 1 do 200m. Obě lodě jsou využívány pro účely kontroly vodních cest, vytvoření podkladů pro projekční práce, podkladů k matematickým modelům a také pro kontrolu jakosti vod (Povodí Vltavy s. p. 2010).

V počátcích batymetrického průzkumu bylo používáno jedno-paprskových echosoundrů. Rychlý pokrok nastal s příchodem multi-paprskových přístrojů (Ernstsen et al. 2006). Tato práce je věnována analýze batymetrických měření

pomocí Echo soundru River Surveyor M9. Přístroj je dokáže zaznamenávat hloubku dvěma způsoby a to buď jedním měřicím čidlem nebo multi-parskovou sadou čidel. Jedná se o velmi přesnou a rychlou metodu. Zařízení pracuje na principu odrazu zvuku o různé frekvenci, takzvaném Dopplerově efektu. Přístroj M9 se řadí mezi takzvané ADP (Acoustic Doppler Profiler), které dokáží jak profilovat dno terénu, tak také měřit rychlosti průtoků v daném profilu (Pokorná 2007).

Rozvoj měřicích technologií a komercializace bezpilotních zařízení, zajistili pokrok také v oblasti batymetrie. Mezi nejmodernější batymetrické technologie, ale zároveň nejdražší, patří v současnosti takzvaný LiDAR (Light Detection and Ranging). Stručně lze LiDAR popsat jako měření vzdálenosti pomocí světelného paprsku různé vlnové délky, pomocí něhož lze vytvářet digitální model jakéhokoli tělesa. Výhodnější oproti starým technologiím je v ovladatelnosti, dosahu měření a možnosti mapování v oblastech s omezeným přístupem (Curtarelli a kol. 2015). Měřicí přístroj obsahuje zdroj světla, optickou soustavu, přesné hodiny a detektor elektromagnetického záření. Právě hodiny měří rychlost odraženého světla a dokáží spočítat vzdálenost a polohu zjišťovaného objektu (Townsend 2004). Přístroje pro měření terénu jsou vybaveny také přesným GPS vysílačem. Pro měření pod vodní hladinou je nutnost využití laseru se zářením v zeleném spektru. Nejpoužívanější červené je totiž vodou zcela pohlcováno (Dolanský 2004).

Převážná část měřicích technologií stanovuje batymetrii ve dvou krocích. V prvním kroku je získána bodová informace o dnu MVN, ve druhém kroku je tato informace generalizována matematickým modelem, který interpoluje bodovou informaci do míst bez měření. Za předpokladu, že povrch Země může být velice členitý a při měření vzniknou plochy, na kterých budou neznámé hodnoty, potom musí být tyto plochy interpolovány (Naoum 2004). V dnešní době je literaturou popsáno více jak 40 metod prostorové interpolace. Rozděleny jsou jako geostatistické, deterministické a kombinované (Li, Heap 2008). Celá řada faktorů (například množství, rozmístění a typ dat) ovlivňuje výsledný odhad interpolované veličiny. Řada studií prokázala, že volba interpolačního postupu je závislá na interpolovaných datech, tudíž neexistuje globální interpolační postup. Proto je nutné pro správný odhad batymetrie vzájemně porovnat celou řadu interpolačních postupů. Například *Meng a kol. (2013)* v analýze věnované porovnání sedmi interpolačních postupů pro stanovení vhodného postupu uvádí, že některé deterministické metody,

například IDW a Spline, dosáhly lepších výsledků než geostatistická metoda Ordinary Kriging (OK). V jiných případech zase vyšla jako lepší geostatistická metoda. Na základě této skutečnosti je potvrzena důležitost vyhodnocení každé použité interpolační metody pro různé sady dat. Šiljeg a kol. (2015) provedli batymetrické měření na největším Chorvatském přírodním jezeře Vrana (30,2 km²). Jako nejvhodnější metoda pro jezero Vrana byl na základě výpočtu vyhodnocen OK. Podobné měření se stejným výsledkem provedl Curtarelli a kol. (2015) na vodní nádrži v Amazonském pralese. Taktéž Bello-Pineda, Stefanoni-Hernández (2007) při batymetrickém průzkumu podzemních jezer dokázali, že nejvhodnější metodou je Kriging. Naproti tomu Merwade a kol. (2006) dokázali, že deterministická metoda IDW, poskytuje přesnější výsledky ve srovnání s geostatistickými metodami. S přihlédnutím na výše uvedená měření je snahou této diplomové práce vyhodnotit různé interpolační metody pro vytvoření přesného modelu dna vodní nádrže Němčice.

2. Cíle diplomové práce

Cílem předložené diplomové práce je vypracování vůbec prvního odhadu batymetrie vodní nádrže Němčice pomocí analýzy batymetrických měření získaných profilovacím zařízením River Surveyor M9 během uplynulého roku a pomocí nich vyobrazit a zhodnotit členitost dna. Vytvoření modelu dna nádrže předchází sběr a zpracování batymetrických měření, jejich zhodnocení a úprava v rámci nastavení přístroje a provedení samotné interpolace. Diplomová práce má také několik dalších dílčích cílů.

Měřená bodová data nepokrývají celou plochu nádrže. Údaje o hloubce na nezměřených plochách jsou aproximovány pomocí devíti interpolačních metod. Dílčím cílem je analyzovat výstupy interpolačních metod pro konkrétní rozlišení vstupních hodnot. Vybrána je interpolační metoda nejvíce vyhovující pro využití při měření na malých vodních nádržích na území České republiky.

Výsledné rastry získané interpolací jsou využity ke zhodnocení objemů nádrže. Dalším dílčím cílem práce je zjištění, jak velký vliv má rozlišení rastru na změnu objemu nádrže a posouzení od jaké velikosti rozlišení již nedochází k jeho výrazným změnám.

Posledním dílčím cílem diplomové práce je porovnání výsledků interpolací a zjištění údajů o režimu sedimentů nádrže, zhodnocení výstupu a lokalizace problémových oblastí. Zhodnocení vlivu sedimentace na Němčické nádrži. Sledování pohybu sedimentů je poměrně časově náročné. V rámci této práce je pohyb sledován během poměrně krátkého časového úseku a to v rozmezí od března do listopadu roku 2015.

3. Struktura diplomové práce

První část diplomové práce je věnována stručnému popisu metod použitých pro interpolaci bodových batymetrických dat. Vybranými metodami jsou Inverse Distance Weighing (IDW), Ordinary a Universal Kriging (OK; UK), Spline, Natural Neighbor (NN), Triangulated Irregular Networks (TIN) a Thiessenovy polygony. Metody jsou zpracovány softwarem ArcGIS od společnosti ESRI. Dále je tato část věnována popisu řešené lokality vodní nádrže Němčice a měřicímu přístroji River Surveyor M9.

Další částí práce je hodnocení měření, úprava dat, nastavení interpolačních metod a posouzení výsledků práce. Měření vždy předchází zhodnocení klimatických podmínek pro aktuální den. Provedeny jsou základní statistická hodnocení změřených dat. Vybraná kontrolní data byla zobrazena a statisticky zhodnocena.

Každá interpolační metoda má své specifické nastavení. Výstupem je tedy devět metod pro čtyři hodnoty rozlišení a to pro všechna tři měření. Dále je vyhodnocena chybovost interpolačních metod. Porovnávají jsou nejen jednotlivé metody a rozlišení, ale jsou mezi sebou porovnávána všechna měření a sady vstupních dat. U nejlépe hodnocené metody je taktéž provedeno statistické vyhodnocení a je pozorována závislost změny objemu na rozlišení rastru.

Poslední část práce je věnována režimu sedimentů nádrže. Srovnány jsou měření první a třetí. Výstupem je mapa lokalizující kritická místa z hlediska možného ukládání sedimentů.

4. Metody

V této části diplomové práce jsou popsány použité interpolační metody pro zpracování batymetrických dat. Dále je popsána řešená lokalita vodní nádrž Němčice, měřicí přístroj pro sběr dat, data poskytovaná tímto přístrojem a také jsou zde popsány chyby, které mohou vzniknout během měření a zpracování dat.

4.1. Interpolační metody

Posouzeno bylo celkem devět interpolačních metod s různými nastaveními vždy podle rozlišení vstupních dat. Metody použité pro odhad ploch s neznámou hodnotou hloubky, byly vybrány z prostředí ArcGIS. Body určené k predikci neznámých hodnot byly vybírány bez ohledu na směr anizotropie a byla pravidelně rozložena dle zvoleného rozlišení. Stejná vstupní data mohou mít jiné výstupy při použití různých interpolačních metod (Arun 2013).

Interpolace umožňuje predikci neznámé hodnoty určité proměnné z hodnot známých, vyskytujících se v okolí řešeného území (Burrough, McDonnell 1998). Interpolační metody vycházejí z principu autokorelace. U autokorelace je dán předpoklad, že podobnost okolních bodů klesá se vzdáleností (Arun 2013). Obecné řešení interpolačních postupů lze znázornit následovně:

$$B(x_0) = f(B(x_i), p) \quad \text{pro } i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$B(x_0)$	hodnota odhadovaná v místě x_0 , určena souřadnicemi (x, y)
f	určitý postup interpolace
$B(x_i)$	množina bodů zvolených pro interpolaci $B(x_0)$. Jedná se o známé body v okolí x_0
p	parametry interpolace

Interpolační metody lze rozdělit dle několika faktorů. Na lokální a globální, geostatistické a deterministické a také na exaktní a aproximující (Angulo-Martinez a kol. 2009). Metody lokální nepracují s celým rozsahem známých dat, ale pouze s určitým výběrem. Naproti tomu globální metody využívají celý rozsah dat. Geostatistické metody využívají nejen matematické ale i statistické metody pro určení neznámých hodnot. Vstupujícím datům jsou přiřazovány určité váhy na

základě autokorelace dat (Li, Heap 2011). Deterministické metody pracují pouze s matematickými funkcemi pro výpočty neznámých hodnot. Exaktní metody striktně dodržují hodnoty naměřených dat, naproti tomu aproximační se liší od změřených hodnot.

4.1.1. IDW

Metoda vah inverzní vzdálenosti (IDW) určuje, že interpolovaná hodnota je definována váženými průměry vybraných bodů z okolí bodu interpolovaného. Podstatou je předpoklad, že blízké hodnoty v prostoru jsou si podobnější, než hodnoty vzdálené (prostorová autokorelace). Pro predikci neznámé hloubky jsou využívány známé hodnoty v okolí. Bližší hodnoty mají větší váhu na odhad neznámé hloubky, s rostoucí vzdáleností vliv okolních bodů klesá (Merwade a kol. 2006). IDW je metodou lokální, deterministickou, aproximující. Rovnice využívaná k odhadu hodnoty ($Z(s_0)$) neznámého bodu lze vyjádřit tímto vztahem:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \alpha_i * Z(s_i) \quad (2)$$

- $Z(s_0)$** je odhadovaná hodnota v neznámém bodě
- N** je počet okolních měření, která vstupují do výpočtu
- α_i** je váhou i -tého měření vstupujícího do interpolace, váha klesá spolu se vzdáleností. Součet všech vah = 1
- $Z(s_i)$** je změřená hodnota v bodě s_i

Váhu α_i lze vyjádřit vztahem:

$$\alpha_i = \frac{d_i^{p-1}}{\sum_{i=1}^N d_i^{p-1}} \quad (3)$$

- d_i** vzdálenost mezi i -tým bodem $Z(s_i)$ a bodem $Z(s_0)$
 p exponent pro kontrolu významnosti okolních bodů
 N je počet okolních měření, která vstupují do výpočtu

Je-li rozmístění změřených bodů pravidelné, o dostatečné hustotě, bude metoda IDW dosahovat nejlepších výsledků pro terén pravidelný, bez výrazných terénních nerovností. Je-li síť vstupních bodů nerovnoměrná nebo případně nedostatečně hustá, může docházet k chybám v interpolovaném povrchu (Watson, Philip 1985). Nevýhodou této metody je, že nedokáže spočítat takové hodnoty, které jsou větší nebo menší než hodnoty ve vstupním datovém souboru. Nelze tedy touto metodou interpolovat například údolí a hřebeny hor, nejsou-li vrcholy a nejnižší body změřeny přímo konkrétními body. Tato metoda má velice vysokou výpočetní rychlost. Často se používá k odhadu meteorologických jevů (Burian 2008).

Nutností je vhodně zvolit množství a vzdálenost všech změřených bodů vstupujících do interpolace. Nejčastěji je pro výběr bodů vstupujících do interpolace volena kruhová výseč. Pro odhad jsou použity všechny body v kruhu bez přihlídnutí ke směru. Odhadovaný povrch je považován za izotropní. Při existenci reálného předpokladu, že vstupní body v určitém směru mohou interpolovanou hodnotu ovlivnit větší vahou než body ostatní, je vhodné zvolit pro výběr elipsu. Hlavní osa elipsy musí být rovnoběžná s definovaným směrem. Pak je odhadovaný povrch považován za anizotropní (Ježek 2015).

4.1.2. KRIGING

Interpolační metoda Kriging je geostatistickou metodou. Kriging pracuje na podobném principu jako metoda IDW. Podobnost spočívá ve výsledném odhadu interpolovaného bodu, na jehož konečné hodnotě se podílí známé body v okolí takovou mírou, kterou jim přiděluje určitá váha těchto bodů. Platí zde stejné tvrzení, že body nacházející se blíže sobě jsou si více podobné, nežli body vzdálené (Merwade a kol. 2006). Diference od metody inverzních vzdáleností se zakládá na takzvané autokorelaci, tedy na prostorové vzdálenosti známých bodů (Johnston a kol 2001). Proto je nezbytné se při krigování věnovat nejprve podrobnému průzkumu dat, abychom stanovili jejich prostorovou strukturu. Tyto struktury jsou dány empirickým semivariogramem, který je popsán níže.

Existuje několik způsobů krigingu. V rámci této práce je pracováno s univerzálním krigingem (UK) a ordinary krigingem (OK). Oba vycházejí ze základní rovnice pro stanovení prostorové hodnoty $Z(u)$. Hodnota hloubky v neznámém bodě $Z(u)$ je rozdělena do složky trendu $m(u)$ a složky rezidua $R(u)$:

$$Z(u) = m(u) + R(u) \quad (4)$$

Z(u) neznámá hodnota veličiny

m(u) složka trendu

R(u) složka reziduí

Složka trendu může být v celé oblasti konstantní nebo funkcí pozice bodu. Složka reziduí je modifikována jako nahodilé pole s nulovou střední hodnotou a kovariací (Goovaerts 1997). Pro dosažení odhadu neznámé hodnoty je nutné určit také váhy λ_α , minimalizující rozptyl odhadu $\sigma_E^2(u)$. Tato podmínka je platná u všech variant krigingu:

$$\sigma_E^2(u) = \text{Var}\{Z^*(u) - Z(u)\} \quad (5)$$

a to v rámci omezení střední hodnoty:

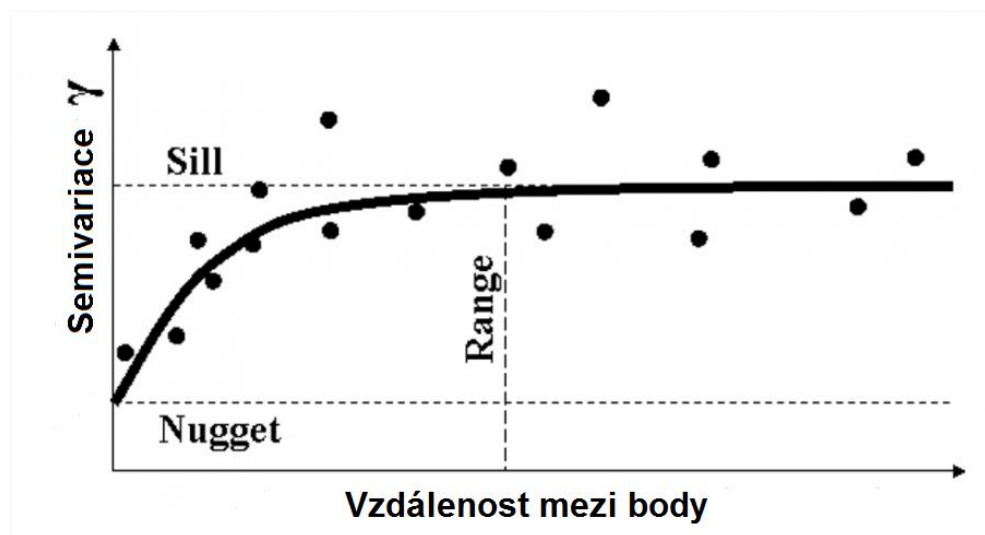
$$E\{Z^*(u) - Z(u)\} = 0 \quad (6)$$

Cílem OK je, aby se střední hodnota rezidua rovnala nule a rozptyl se minimalizoval (Peng a kol. 2014). Složka trendu $m(u)$ je zde konstantní. Například u

sférického modelu teoretického semivariogramu od jisté vzdálenosti autokorelace takřka zaniká. U modelu exponenciálního dochází k zániku autokorelace až v nekonečnu.

UK má střední hodnotu trendové složky $m(u)$ neznámou, přímou kombinací povědomých funkcí. Složka trendu $m(u)$ je proměnná s polohou bodu. Tento trend je možné znázornit jako lineární kombinaci polynomů s různým stupněm. Nejvíce používány jsou polynomy prvního a druhého stupně.

Jak již bylo zmíněno k výpočtu neznámé hodnoty metodou kriging je zapotřebí vytvoření empirického semivariogramu. Ukázkou toho, jak jsou měřené body umístěny v prostoru, naznačuje semivariogram na Obrázek 1. Porovnávána je rozdílnost dvojic bodů pro různé vzdálenosti. Osa x vyjadřuje vzdálenost a osa y zobrazuje průměry semivariace. S přibývajícím počtem změřených bodů výrazně stoupají vzdálenosti bodů. K popsání modelu se využívají charakteristiky semivariogramu jako: range, sill a nugget. Range je hodnota vzdálenosti, při které autokorelace již nepůsobí. Sill je hodnotou autokorelační funkce ve vzdálenosti range. Nugget je velikostí vlivu v nulové vzdálenosti od interpolovaného místa, jde tedy o variabilitu jevu vyskytujícího se všude nezávisle na poloze (šum). O tuto hodnotu ($\text{nugget} > 0$) je posunuta celá křivka na ose y (Angulo-Martinez a kol. 2009).



Obrázek 1: Semivariogram s vyznačenými mezními hodnotami
(zdroj: Karl a Maurer 2010)

Změnu proměnné hodnoty změřené v konkrétním místě při transformaci vzdálenosti je možné vyjádřit rovnicí empirického semivariogramu (Pokhrel a kol. 2012):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (P_L(i) - P_L(i,h))^2 \quad (7)$$

$\gamma(h)$	predikovaná hodnota semivariace pro vzdálenost h
$n(h)$	počet párů datových bodů pro vzdálenost h
$(P_L(i) - P_L(i,h))^2$	rozdíl P_L z v i-tém párovém místě, ve vzdálenosti h

Rovnice znázorňuje zprůměrovaný, umocněný rozdíl všech měřených párů sad dat. Lomena dvěma, je rovnice kvůli oboustrannému počítání vzdálenosti jednotlivých párů.

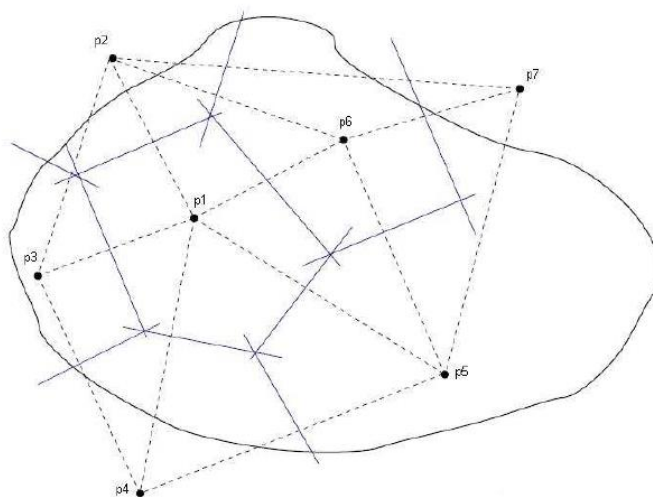
Po vytvoření empirického semivariogramu je nutné zvolit funkci teoretického variogramu, což je matematická funkce, kterou se proloží empirický variogram a která ovlivňuje výslednou hodnotu vah (Cressie 1993). Na výběr v prostředí ArcGIS jsou tyto rovnice matematických modelů: sférická, exponenciální, kruhová, lineární a Gaussova. Zvolený model ovlivňuje odhad neznámé hodnoty. Čím strmější tvar křivky na začátku, tím větší vliv mají blízké hodnoty na odhad. V této práci je pro OK zvoleny sférické a exponenciální rovnice matematického modelu pro odhad semivariogramu a pro UK rovnice kvadratické a lineární.

Nejčastější využití nachází tato metoda v důlním inženýrství a aplikované geostatistice hydrologii a geologii.

4.1.3. THIESSEN POLYGONS

Metoda vychází z takzvaných Voroninových diagramů. Voroninovy diagramy, které se používají v meteorologii a pro analýzu prostorových dat, se nazývají Thiessenovy polygony. Je založena na velice jednoduchém principu.

Přímkami jsou propojeny sousední známé body, tyto spojnice jsou následně ve své polovině protnuty kolmicemi na tyto spojnice. Vytvořené linie se stávají hranicemi jednotlivých Thiessenových polygonů (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Každému z polygonů připadá právě jeden měřený bod (p_1, \dots, p_n), neznámým bodům, nacházejícím se uvnitř vytvořeného polygonu, je přidělena hodnota měřeného bodu toho polygonu (Brassel a kol. 1979).



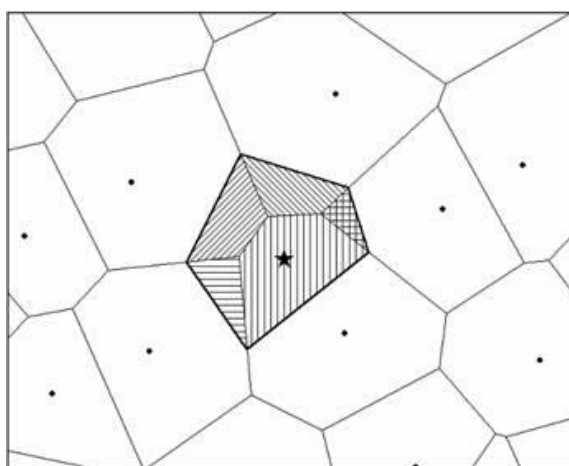
Obrázek 2: Thiessenovy polygony

Jednou z nevýhod této metody je například fakt, že krajní body mají prakticky nekonečnou plochu, jelikož nemají další sousední body. Výsledné polygony musí být oříznuty hranicemi zájmového území. Další nevýhodou metody je, že predikce hodnoty je založena pouze na jedné proměnné. Při větších mezerách mezi měřenými body teoreticky může docházet k nepřesnostem mezi interpretovaným povrchem a skutečností.

Thiessenova polygonová metoda samostatně není příliš využívána. Je však základem ostatních interpolačních metod, například Natural Neighbor a TIN.

4.1.4. NATURAL NEIGHBOR

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, metoda Natural Neighbor (NN) česky nazývána také jako metoda přirozeného souseda, je založena na principu Thiessenových polygonů. V první řadě je vytvořena síť Thiessenových polygonů z měřených bodů, poté je do této vytvořené sítě vložen bod odhadovaný a spolu s ním je vytvořena síť nových polygonů. Následně jsou obě polygonové sítě porovnány a je vyhodnoceno jakou plochou zasahují části polygonu predikovaného bodu do polygonů bodů měřených (Obrázek 3).



Obrázek 3: Šrafování je vyznačen Thiessenův polygon interpolovaného bodu, jednotlivé šrafování vyznačují plochy, kterými je ovlivněna výsledná hodnota

Právě body, které svými polygony ovlivňují výslednou hodnotu, jsou nazývány přirozenými sousedy. Jejich váhy určuje velikost ploch zasahujících do polygonu predikovaného bodu:

$$A(x) = \sum_{i=1}^n A_i \quad ; \quad \lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (8) \quad (9)$$

A(x)	plocha polygonu predikovaného bodu x
A_i	plocha polygonu i-tého přirozeného souseda
λ_i	váha, ovlivňující odhadovanou hodnotu
n	počet polygonů ovlivňujících odhad neznámé hodnoty

Odhadované hodnoty nepřesahují extrémy naměřené sady dat. Obdobně jako u metody IDW tedy není vhodná pro interpolaci hřebenů a údolí, pokud tyto extrémy nejsou změřeny zvlášť (Arun 2013).

4.1.5. SPLINE

Velmi přesná deterministická interpolační metoda pracující s bázovou funkcí Spline. Metodu Spline si lze velmi jednoduše představit jako proložení známých bodů elastickou membránou (Johnston a kol. 2001). Na rozdíl od metody IDW můžeme pomocí Spline odhadnout hodnoty přesahující extrémní hodnoty datové sady (Peralvo 2012). Funkce metody spočívá na počítání matematicky vyjádřených křivkách a vychází ze dvou předpokladů. V první řadě funkce prochází měřenými body (je metodou exaktní) a za druhé výsledný povrch má být co nejvíce vyhlazen. Platí, že s rostoucím počtem dat je výsledný povrch hladší. Každou z jednotlivých částí interpolovaného povrchu reprezentuje samostatná polynomická funkce. Musí však být zajištěno propojení sousedních funkcí. Spline funkci lze zapsat takto:

$$S(s) = T(s) + \sum_{i=1}^n \lambda_i R(r_i) \quad (10)$$

T(s) polynomická funkce

λ_i koeficienty měřených bodů

R(r_i) základní radiální funkce závisující na vzdálenosti r_i

r_i vzdálenost mezi s a i-tým bodem

n počet měřených bodů

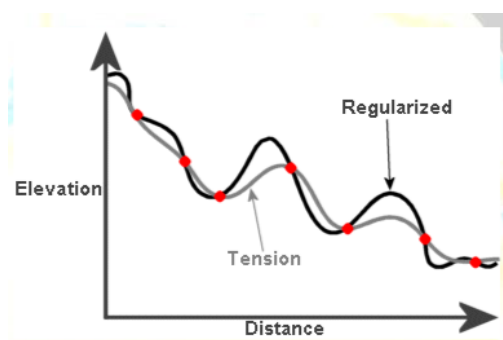
Polynomickou funkci a základní radiální funkci volíme podle typu Spline metody. Rozlišujeme několik druhů funkcí. V rámci této práce je pracováno s těmito:

- spline s tenzí
- regularized spline

Minimální křivost je dána matematickým výrazem minimalizace sumy kvadrátů druhé derivace.

Spline s tenzí upravuje minimalizování zakřivení přidáním členů první derivace. Velikost váhy udává váhu přidělenou první derivaci během minimalizace. S rostoucími hodnotami vah dochází ke zdrsňování povrchu (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

Regularized spline upravuje minimalizování zakřivení přidáním členů třetí derivace. Velikost váhy ztvárňuje váhu přidělenou třetí derivaci během minimalizace (Obrázek 4).



Obrázek 4: Spline s tenzí – šedá; Regularized spline – černá

Pro své vlastnosti není doporučeno metodu Spline používat při modelování velmi členitého terénu, kde se vedle sebe vyskytují velice rozdílné hodnoty. Nejlépe hodnocena je metoda při využití na málo členitém terénu.

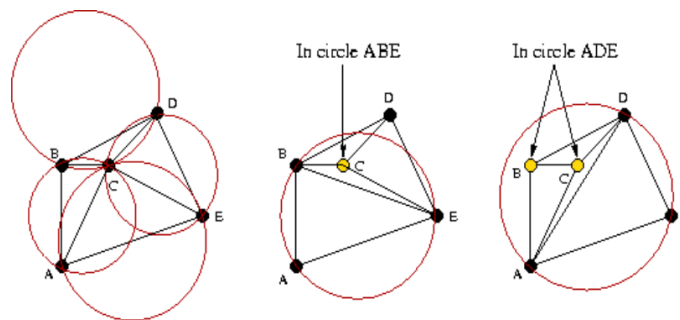
4.1.6. TIN

Metoda TIN je založena na vytvoření sítě nepravidelných trojúhelníků. Změřené vstupní body jsou spojovány liniemi tak, aby vznikla nepravidelná trojúhelníková síť. Hodnoty na počátcích a koncích jednotlivých linií jsou známé hodnoty, pro odhad hodnoty mezi právě dvěma body na linii je použita jednoduchá lineární závislost. Tato metoda je jak interpolační, tak slouží i pro zobrazení spojitého povrchu. Metoda je exaktní a její využití je vhodné také při nerovnoměrném rozložení vstupních bodů, lze s ní interpretovat i povrchy, které se

vyznačují prudkými změnami terénu. Metodu nelze použít pro extrapolaci, výsledkem je totiž plocha vzniklá z propojení známých hodnot vrcholů trojúhelníka. Vytvoření nepravidelné trojúhelníkové sítě je dáno tímto postupem:

- volba příznačných bodů
- volba spojení dat do trojúhelníkové sítě
- metoda vytvoření povrchu uvnitř vzniklých trojúhelníků

Postup propojení vstupních bodů trojúhelníkové sítě je v softwaru ArcGIS řešen metodou takzvaných Delaunay triangulace. Delaunay triangulace je definována takto: Tři vstupní body vytvoří Delaunay trojúhelník jen za předpokladu, že kružnice opsaná z těchto tří bodů nepřekrývá žádný jiný vstupní bod (Obrázek 5). Je tak zajištěno, že vnitřní body vzniklého trojúhelníka jsou blíže alespoň jednomu ze tří známých vrcholů. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.3. *Thiessenovy polygony*, metodu TIN lze praktikovat za pomoci právě Thiessenových polygonů a to tak, že Delaunay trojúhelníky mohou být vytvořeny ze vzniklé polygonové sítě.



Obrázek 5: vlevo: v kružnicích opsaných se nenachází žádný další bod = správný postup; uprostřed: v kružnici opsané pro body ABE se nachází bod C = trojúhelníky se nevytvoří; vpravo: v kružnici opsané pro body ADE se nachází body B a C = trojúhelníky se taktéž nevytvoří

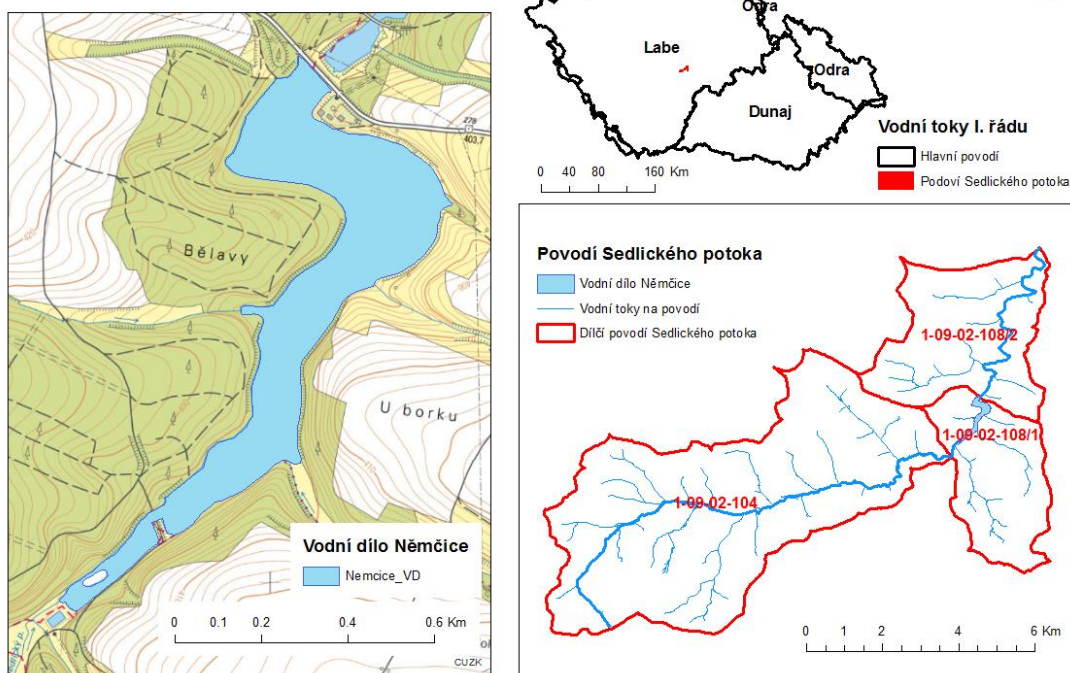
(zdroj: http://www.geom.uiuc.edu/~samuelp/del_project.html)

Metoda TIN je také vhodná pro následné vytvoření izolinií, tedy čar spojujících místa o stejné hodnotě. U modelování zemského povrchu jsou izolinie nazývány vrstevnicemi. Aby bylo zajištěno vyhlazení izolinií, spojují se jednotlivé body pomocí nelineárních funkcí.

4.2. Popis lokality

Vodní nádrž Němčice se nachází v ústí povodí Sedlického potoka o rozloze 82,3 km², které se rozkládá v jihovýchodní části Středočeského kraje. Sedlický potok, s číslem povodí 1-09-02-104 je levostranným přítokem Želivské nádrže, ležící mezi 7 a 9 říčním kilometrem. Pramení u obce Palčice (595 m.n.m.) a ústí u obce Hulice (377 m.n.m.). Polohu nádrže a tvar povodí zobrazuje Obrázek 6.

Umístění vodního díla Němčice



Obrázek 6: Identifikace vodní nádrže Němčice v rámci hlavního povodí Labe a dílčího povodí Sedlického potoka (vytvořil: Jan Prchal)

Zatopená plocha nádrže je 21,55 ha, celkový objem činí 1,157 mil. m³ (Povodí Vltavy s. p., 2010). Hladina vody je ovlivněna především přítokem Sedlického potoka (průměrný přítok 0,31 m³/s) a srážkami na nádrži. Výstavba započala spolu s výstavbou nádrže Želivka v roce 1975. Dokončena byla o pět let později v roce 1980. Dílo se nachází v II. pásmu hygienické ochrany vodárenské nádrže Želivka.

Nádrž slouží především jako stabilizační nádrž, konkrétně k zachycení sedimentů nesených Sedlickým potokem a sedimentů způsobeného smyvem z okolí nádrže (Milerski 2004). Zanášení na přítoku je patrné již při pohledu na sedimentační kužel vytvořený v malé před-nádrži (Obrázek 7).

Ortofoto snímek sedimentačního kuželu na přítoku



Vypracoval: Jan Prchal

Obrázek 7: Ortofoto snímek sedimentačního kuželu na přítoku vodní nádrže Němčice

Okolí nádrže se od dostavby v roce 1980 výrazně nezměnilo. Topografie krajiny před výstavbou umožnila vybudování nádrže bez větších terénních úprav. Jak je patrné z přílohy *Obrázek 40*, došlo k zatopení travního porostu s občasným výskytem jednotlivých stromů. V současné době je nádrž z pravého břehu chráněna lesním porostem. Levý břeh je oproti pravému výrazněji otevřenější. Jak je patrné na zobrazení průměrné dlouhodobé ztrátě půdy, *Obrázek 8*.



Obrázek 8: Potencionální ohroženost ZPF pomocí univerzální rovnice ztráty půd (USLE). Jednotkou je průměrná dlouhodobá ztráta půdy G [tuna/ha/rok].

(zdroj: <http://geoportal.vumop.cz/index.php>)

Nejvíce ohrožené části nádrže jsou pravý břeh u přítoku a pravý břeh ve střední části nádrže. V současné době jsou tyto dvě části opatřeny stromovou výsadbou. Další otevřenou částí donedávna byl Severo-východní břeh, kde však díky zamezení přístupu veřejnosti a vybudováním protierozních opatření nedochází k podstatnějšímu ohrožení smyvu půdy. Jedinou nevýhodou této části nádrže je nevhodná výsadba listnatých stromů v bezprostřední blízkosti břehů. U vzrostlých stromů na svažitém terénu dochází k naklonění a následnému pádu do vodní plochy, což například způsobuje určité komplikace při samotném měření. Padlý strom se musí obeplout a polámané větve mohou znehodnotit data v konkrétním místě nebo případně i poškodit hlavici měřicího přístroje.

Nádrž byla zvolena jako vhodná pro účely porovnání přesnosti bodového měření pomocí výše uvedených interpolačních metod. K podrobnému batymetrickému průzkumu na nádrži nedošlo. Každých pět let dochází k odbagrování nanesených sedimentů, jiná opatření se v současné době neprovádí.

4.3. Technologie sběru batymetrických dat

Mapování dna malých vodních nádrží na území České Republiky není v současné době příliš rozšířeno. Díky moderním technologiím je dnes možné velmi rychle a přesně měřit batymetrická data na většině vodních ploch. Moderní měřicí přístroje jsou dostupné široké veřejnosti a jejich obsluha není složitá.

Měření v rámci diplomové práce proběhlo pomocí přístroje River Surveyor M9. Zařízení bylo nutné před každým použitím nastavit pro dané podmínky a kalibrovat. Sada pro měření obsahuje několik částí:

1. měřicí hlavice, osazené dvěma sadami snímačů měření rychlosti, jedním snímačem hloubky a teplotním čidlem (Obrázek 9)
2. napájecí a komunikační modul (PCM), sloužící pro vzdálenou komunikaci s PC nebo mobilním zařízením.
3. základní stanice RTK (RTK Base Station) (Obrázek 43 v příloze).

Zařízení patří mezi takzvané ADP (Acoustic Doppler Profiler), tedy přístroje fungujícího na bázi Dopplerova efektu.

Dopplerův efekt je fyzikální jev zabývající se snímáním a vyhodnocováním odrazu zvuku. Podstatou je vzájemný pohyb pozorovatele a zdroje signálu. Dochází ke změně frekvence signálu vysílaného oproti přijímanému (Štoll 1993).

Výrobce River Surveyor M9 je firma SonTec. Přístroj je vytvořen primárně jako profilovací zařízení pro zjišťování průtoků na říčních tocích. Měření v rámci této práce probíhalo na vodní nádrži, kde rychlost průtoku vody zanedbáváme. Pro účely této práce byla však využívána především schopnost přístroje měřit hloubku. Hloubky lze měřit dvěma možnými způsoby, oba jsou podrobněji popsány v kapitole 4.3.1 *Data* (SonTec, 2011).



*Obrázek 9: Měřicí hlavice s čidly. Průměr hlavice je 13 cm
(zdroj:<http://www.sontek.com/>)*

Pohyb měřicího přístroje po vodní hladině nebyl realizován pomocí žádného mechanického pohonu, měření proběhlo zásadně díky ručnímu pohonu. Součástí měřicí sady je dodáván také plovák pro umístění měřicí hlavy a PMC modulu. Manipulace s tímto plovákem na malých vodních nádržích byla poměrně nevhodná a časově nevyhovující. Pro účely zefektivnění měření byl nyní speciálně upraven dvoumístný kajak (*Obrázek 10* a v příloze *Obrázek 44*). Plovák, který je součástí dodávané sady bylo nutné tahat za lodí. Docházelo tak ke znehodnocení měření díky vlnám vznikajícím pohybem lodě. Kajak je navržen tak, že přední sedací část je opatřena otvorem pro měřicí hlavici a prostorem pro umístění PCM modulu. Vše je před vodou chráněno neoprenem opatřeným otvorem pro klobouk antény pro komunikaci s RTK stanicí. Důležité pro správnost měření je nastavení hloubky ponoru a to podle váhy osoby provádějící měření. Proto byl bok lodi opatřen měrnou ryskou pro jednoduchý výpočet ponoru.



Obrázek 10: Upravený dvoumístný kajak (foto: Jan Prchal)

4.3.1. Data

Data měřená přístrojem River Surveyor M9 byla získána při využití různých frekvencí. Vyšší frekvenční hodnoty mohou procházet jemnými sedimenty na dně a naopak nižší frekvence mohou být nepřesné v kalnějších vodách (Ernstsen 2006). Data poskytovaná přístrojem jsou zásadně bodová, snímána v liniích podle směru plavby. Časová frekvence snímání je jeden bod za vteřinu. Pro účely práce jsou důležité především hloubkové údaje.

Přístroj je opatřen dvěma způsoby sledování hloubky Vertical acoustic beam (VB) a Bottom-track (BT) (Obrázek 11). Oba jsou založené na měření pomocí různých frekvencí. Každý je vhodný pro jinou hloubku. Přístroj se dá nastavit tak, že vyhodnocuje měřenou hloubku a podle toho ukládá data pro daný bod, buď z VB nebo BT. Cílem tedy je vyhodnocení přesnosti těchto dvou sad.

VB o frekvenci 0,5 MHz je čidlo měřící pouze jedním paprskem ve vertikální poloze a je určeno jen k vyhodnocování hloubky. Jde o vysoce přesný echo sounder pro měření až do hloubky 80 m. Nevýhodou tohoto měření je, že paprsek je pouze jeden. V případě že narazí na nějakou překážku, například rybu, větev nebo jinou plovoucí neprostupnou věc, je údaj o hloubce dna v konkrétním bodě zkreslen.

BT je sada čtyř měřících čidel o frekvenci 3 MHz. Tento typ měření je vhodnější pro měření spíše v menších hloubkách. Sada je určena k vyhodnocení plochy, vzdálenost měření a také jeho hloubky. Pro účely diplomové práce pracujeme pouze s údajem o hloubce. Výhodou BT je, že měřící paprsky tvoří kužel a výsledná hodnota je průměrována ze všech čtyř paprsků. Z toho vyplývá také nevýhoda BT a to, že s rostoucí hloubkou roste také rozptyl měřících paprsků.



Obrázek 11: Rozmístění měřících paprsků. Uprostřed VB, po stranách BT

(zdroj: <http://www.quantum-hydrometrie.de/>)

Data měřená přístrojem byla, z důvodu lepšího zasazení do terénu a zpřesnění interpolací na březích nádrže, rozšířena o výškové údaje okolního terénu do vzdálenosti sta metrů od okraje nádrže. Doplňující data byla získána vektorizací z WMS – DMR 5G poskytovaných ČÚZK. Tyto data vyobrazují přirozený nebo antropogenní činností upravený digitální povrch. Jedná se o vektorizovanou bodovou vrstvu se souřadnicemi X, Y a H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku konkrétních bodů.

4.3.2. Chyby dat

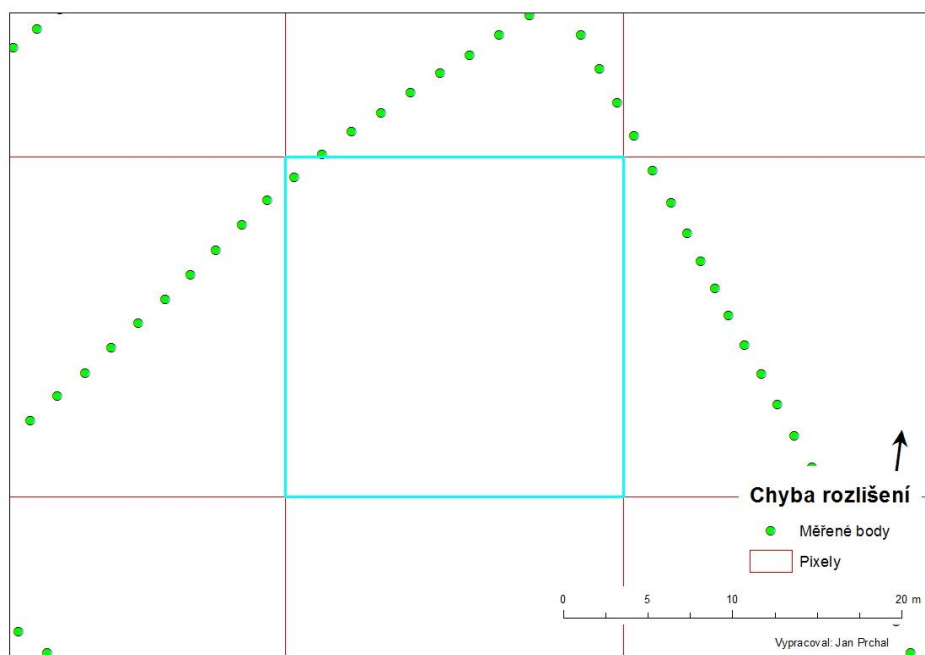
Bodová data obsahují jisté chyby, které mohou ovlivnit výsledný model reliéfu dna nádrže a prováděné analýzy dat. Určité chyby vznikaly při různých částech zpracování dat. Při měření samotném, zpracování v PC, rozdělování měření podle rozlišení a při interpolacích v prostředí ArcGIS (Kadlčíková 2007).

Chyba vzniklá při najíždění nádrže spočívá v tom, že při plavbě po vodní hladině se mohou vyskytnout větší plochy bez zaměřených bodů. Tuto chybu lze eliminovat například měřením řízeným přesně určenou trasou pomocí GPS souřadnic.

Další možnost vzniku chyby byla při samotném měření. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3.1. *Data* hloubky jsou získávány, buď jedním paprskem VB nebo sadou čtyř BT. Při měření VB možnost vzniku chyby spočívá v tom, že paprsek odrazí první překážku, na kterou narazí a sonar jí vyhodnotí jako měření hloubky. Tyto překážky však nemusí být vždy na dně. Měření mohou například ovlivnit plavoucí předměty, padlé dřeviny a ryby (Pribičevič a kol. 2007). U měření BT byla podobná chyba eliminována průměrováním měření ze čtyř paprsků. Určitá chyba od skutečné hodnoty rostla spolu s hloubkou měření. Čím větší hloubka, tím větší byla snímaná plocha a průměrná hodnota byla ovlivněna různými hodnotami, měřenými jednotlivými paprsky. Analyzování takovýchto chyb lze provést vizuální kontrolou, zda se v datech nevyskytují hodnoty, které by za normálních podmínek nenastaly.

Další určitá chyba vznikla při rozdělení dat dle rozlišení. Pro každý pixel byly počítány průměrné a střední hodnoty dat procházejících konkrétním pixelem. Při menším rozlišení, data procházela jen částí jednoho pixelu, ovlivnila jeho výslednou

hodnotu (Obrázek 12). Omezení této chyby opět spočívá v podrobnější a pravidelnějším kroku získávání dat.



Obrázek 12: Data procházející jen částí vybraného pixelu ovlivní výslednou hodnotu celého pixelu.

Chyby vzniklé při interpolaci dat lze kontrolovat několika způsoby. Jako první je vizuální kontrola výsledných dat. Sleduje se, zda se ve výsledném rastru neobjevuje výrazná odchylka od dat měřených. Další možností vizuální kontroly je zasazením výsledného terénu do existující mapy. Kontrolujeme, zda břehy nádrže postupně přechází do okolního terénu (Kadlčíková 2007).

Další kontrolu výsledného rastru lze provést pomocí takzvané Křížové validace dat (Cross-validation) a následného výpočtu RMS chyby měření. Křížová validace spočívá v tom, že část dat z výsledného rastru je vybrána jako kontrolní data a po provedení interpolace jsou tyto kontrolní data porovnávána s výsledným rastrem. Na základě rozdílů hodnot je počítána chyba RMS (*kapitola 4.3.3. RMSE*).

4.3.3. RMSE

Root Mean Square Error (RMSE) – druhá odmocnina střední kvadratické chyby, jedná se o nejpoužívanější metodu pro kvantifikaci náhodných i systematických chyb. Náhodná složka je velikost rozptylu vstupních hodnot od střední hodnoty, je tak reprezentována stabilita interpolace. Cílem při nastavování atributů interpolace je dosáhnout co možná nejmenší RMS chyby (Chai, Draxler 2014). Matematický vztah výpočtu lze zapsat takto:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (11)$$

x_i pozorovaná hodnota v bodě i (X,Y)

y_i interpolovaná hodnota v bodě i (X,Y)

N počet kontrolních dat

4.3.4. MAE

Mean Absolute error (MAE) – střední absolutní chyba. Tento výpočet kvantifikuje průměrnou absolutní chybu mezi naměřenou a odhadnutou hodnotou a ukazuje jak vzdálený je odhad od skutečného výsledku. Matematický vztah výpočtu lze zapsat takto:

$$MAE = \frac{1}{N} * \sum |y_i - x_i| \quad (12)$$

x_i pozorovaná hodnota v bodě i (X,Y)

y_i interpolovaná hodnota v bodě i (X,Y)

N počet kontrolních dat

5. Výsledky

První částí výsledků práce, bylo provedení samotného měření. Analyzována a zobrazena byla všechna tři měření. Byl sledován také aktuální stav na povodí během probíhajících měření. Ke splnění cílů diplomové práce byla nutná předpříprava změřených dat, tak aby bylo možné posoudit vhodnost dat pro následující analýzy. Data vyhodnocená jako vhodná pro interpolaci byla aplikována do jednotlivých metod. Všechny metody bylo nutné před výpočtem vhodně nastavit. Jako další krok po interpolaci chybějících dat bylo vyhodnocení výpočtů a analýza chyb pomocí Cross-validace. Na základě provedené analýzy byla také vyhodnocena nejpřesnější metoda pro daná bodová data. Dále byla provedena analýza změny objemů v závislosti na změně rozlišení. Porovnáním výsledků měření byl vyhodnocen pohyb sedimentů na dně nádrže. Jako poslední část byl vytvořen model reliéfu dna, zasazený do okolního terénu.

5.1. Preprocessing dat

Sběr liniových batymetrických dat proběhl celkem třikrát během uplynulého roku 2015. Před prvním měřením byl po domluvě s Povodím Vltavy s. p. proveden terénní průzkum lokality. Byly vytipovány případné lokality pro postavení základní stanice RTK a nejvhodnější přístup k vodní hladině. Všechna měření proběhla za dobré viditelnosti a převážně jasného počasí.

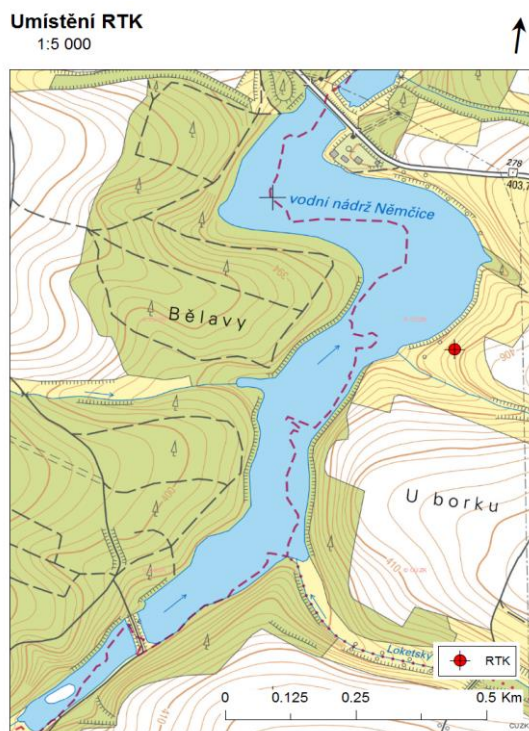
Pro jednotlivá měření byly v konkrétní den na stránkách Povodí Vltavy s. p. sledovány aktuální informace o stavu hladiny, množství srážek a velikosti průtoků na přítoku i odtoku z nádrže (Tabulka 1). Průměrná hodnota hladiny během tohoto roku byla 385.06 m. n. m.

	stav hladiny [m.n.m.]	Srážky [mm]	Přítok [m³/s]	Odtok [m³/s]
27. 3. 2015	385.09	0.6	0.26	0.22
28. 8. 2015	385.04	0	0.04	0.4
18. 11. 2015	385.07	0	0.101	0.1

Tabulka 1: Hodnoty sledované na stránkách Povodí Vltavy s. p. vždy pro konkrétní den měření.

(zdroj: <http://pvl.cz/>)

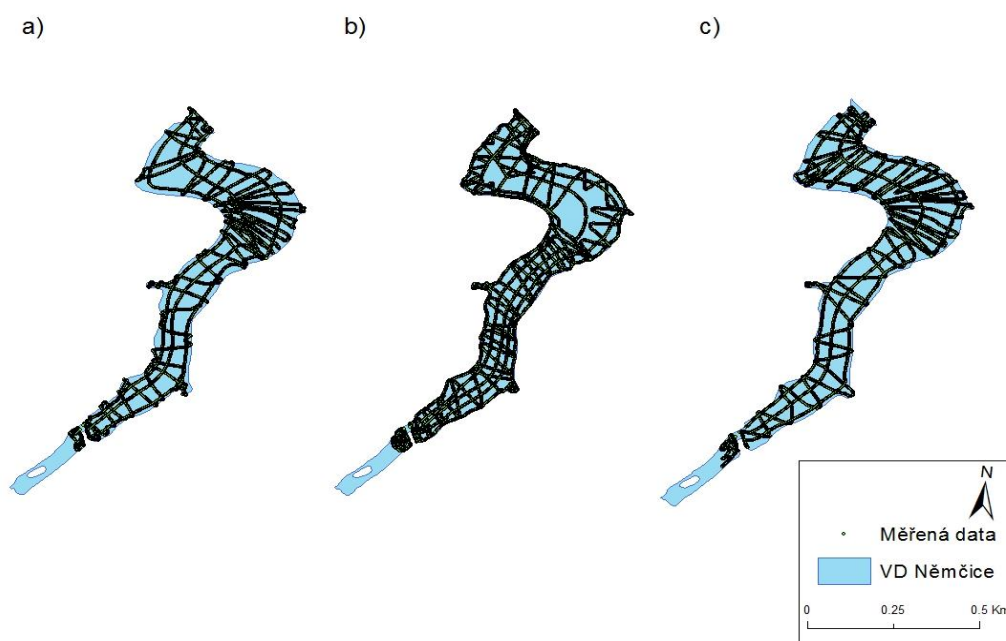
Základní stanice byla vždy umístěna na louce nad severním okrajem nádrže (Obrázek 13). Místo bylo zvoleno pro dobrou viditelnost na větší část plochy nádrže a také zde byla platná podmínka, že základní stanice by neměla být od přístroje dále než 2 km.



Obrázek 13: Poloha základní stanice RTK (Vypracoval: Jan Prchal)

Před spuštěním lodi na vodu bylo nutné provést nastavení a kalibraci přístroje, aby byla zajištěna správnost měření při náklonech lodi během měření. Pro přesnost měření byl nastaven přesný ponor lodi. Toto nastavení se provedlo pomocí měření na boku lodi a následného odečtu na vodní ploše.

Jednotlivá měření byla rozdělena na několik transektů, nádrž byla najížděna z jednoho břehu na druhý (Obrázek 14). Průměrná celková délka měření byla 12 487,76 km a s průměrným počtem 8 818 naměřených bodů. Najíždění nádrže nepředcházelo plánování trasy, jako bylo použito na jezeře Vrana (Šiljeg a kol. 2015). Orientace při měření probíhala vždy pouze vizuálně a to podle objektů na protějším břehu.



Obrázek 14: a) měření 1 b) měření 2 c) měření 3
(Vypracoval: Jan Prchal)

První měření na nádrži proběhlo 27. března 2015 (Tabulka 2). Na vodní ploše došlo ke kompletnímu rozmrznutí ledové pokrývky a bylo tak možné se dostat do všech částí vodní plochy. Najety byly transekty o celkové délce 12 487,76 km a získáno 8 038 bodů. Na jeden metr čtvereční nádrže připadá 0.04 bodu.

	Počet	Min	Max	Suma	Průměr	Standardní odchylka
VB Depth	8038	0	8.40	24518.01	3.05	2.14
BT Depth	8038	0	8.28	24514.41	3.05	2.08

Tabulka 2: Sumarizace prvního měření

Druhé měření proběhlo dne 28. srpna 2015 (Tabulka 3). Díky výrazně suchému a teplému období v roce 2015 byl na hladině nádrže zaznamenán nadměrný výskyt vegetace. Měření však vrstvou vegetace nějak ovlivněno nebylo. Najety byly celkem transekty dlouhé 15 820,57 km a získáno 10 329 bodů. Na jeden metr čtvereční nádrže připadá 0.05 bodu.

	Počet	Min	Max	Suma	Průměr	Standardní odchylka
VB Depth	10329	0	9.40	26573.70	2.57	2.08
BT Depth	10329	0	8.30	26660.17	2.58	2.03

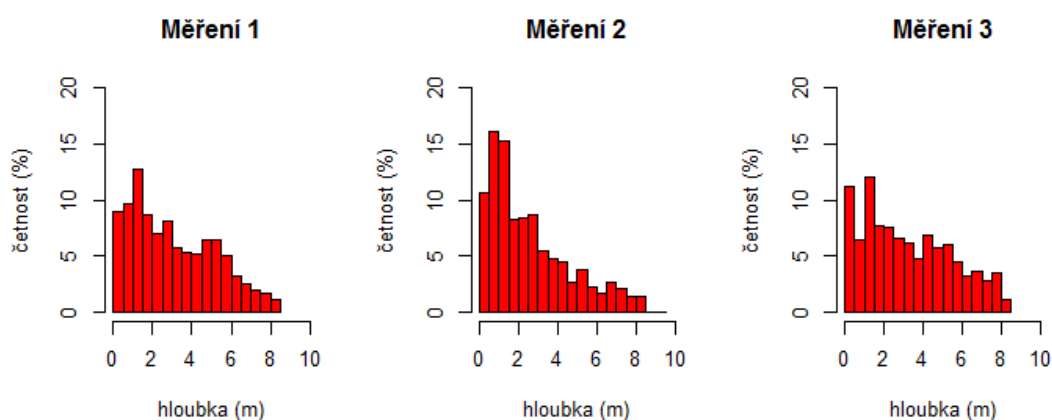
Tabulka 3: Sumarizace druhého měření

Třetí a zároveň poslední měření se uskutečnilo 18. listopadu, hned po prvních mrazových dnech (Tabulka 4). Předpokladem bylo, že se většina vegetace vzniklé během vegetačních období již byla usazena u dna nádrže. V České republice je až třetina vodních ploch zatížena sedimenty (Kubík 2011). Ve třetím měření byly najety transekty o délce 13 151,18 km a získáno bylo celkem 8 087 bodů. Na jeden metr čtvereční nádrže připadá 0.04 bodu.

	Počet	Min	Max	Suma	Průměr	Standardní odchylka
VB Depth	8087	0	8.35	26115.38	3.23	2.27
BT Depth	8087	0	8.22	26198.93	3.24	2.21

Tabulka 4: Sumarizace třetího měření

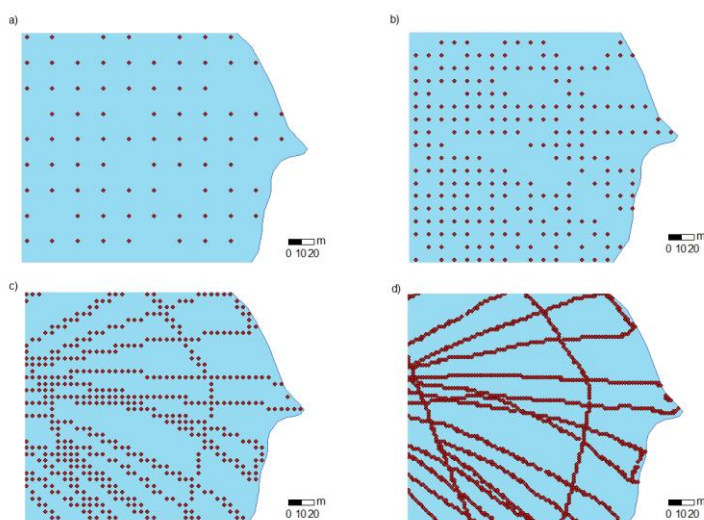
Průměrná hloubka dat všech tří měření, před rozdělením podle rozlišení, činí 2,95 m. Dále jsou zobrazeny histogramy naměřených hloubek jednotlivých měření (Obrázek 15).



Obrázek 15: Histogramy hloubek měřených přístrojem ze všech tří měření

Získané údaje ze všech tří měření byly přeneseny do PC pomocí softwaru River Surveyor Life. Data bylo zapotřebí upravit před vstupem do interpolací, tak aby bylo možné splnit cíle diplomové práce. Úprava dat proběhla v následujících krocích:

1. Nádrž byla rozraštována do rozlišení 20, 10, 5, 2 m. Střed každého rastru je definován souřadnicemi X, Y.
2. Data z jednotlivých transektů byla spojena do jednotné formy a byla transformována ze souřadnicového systému UTM do systému S-JTSK Křovák East North.
3. Byl vytvořen průnik měřených dat s jednotlivými pixely rastrů. Dále byly v těchto pixelech vypočteny střední a průměrné hodnoty pro VB i BT a výsledné hodnoty byly přiřazeny k jednotlivým pixelům rastrů (*Obrázek 16*).
4. Získané naměřené hodnoty byly přes ID přiřazeny k celkovému rastru nádrže, tím byly získány pixely pravidelného rozestupu, využitelné pro interpolaci a byla také odečtena hloubka od aktuálního stavu hladiny pro jednotlivá měření. Byl tak definován údaj o nadmořské výšce bodů (*Tabulka 5*).
5. Definované body byly zasazeny do bodových dat okolního terénu. Data pro okolní terén byla vybrána v okruhu 100m od zvoleného okraje nádrže.



Obrázek 16: Detail hustoty dat při rozlišení: a) 20 m; b) 10 m; c) 5 m; d) 2 m (Vypracoval: Jan Prchal)

Počet bodů vstupujících do interpolace, se lišil dle druhu měření. VB má v průměru o 5 bodů méně než BT (Tabulka 5). Průměrné pokrytí nádrže změřenými body pro rozlišení 20m bylo 77,03 %, pro 10m 51,13 %, pro 5m 30,55 % a pro 2m to bylo 11,17 %. Naměřená data nevykazovala značné rozdíly v četnostech naměřených hloubek při změně rozlišení. Průměrná hloubka vstupních dat vychází na 3,51 m. Oproti datům získaným před rozdělením dle velikosti rozlišení se průměrná hloubka zvýšila o 0,56 m. Dále je zobrazena tabulka sumarizací a sumarizace s histogramy pro vzdálenosti bodů i hloubky měření pro rozlišení 2 m (Tabulka 6, Tabulka 7 a Obrázek 17, Obrázek 18). Tabulky a grafy ostatních rozlišení jsou zobrazeny v příloze (Tabulka 19 – 26 a Obrázek 45 -Obrázek 52).

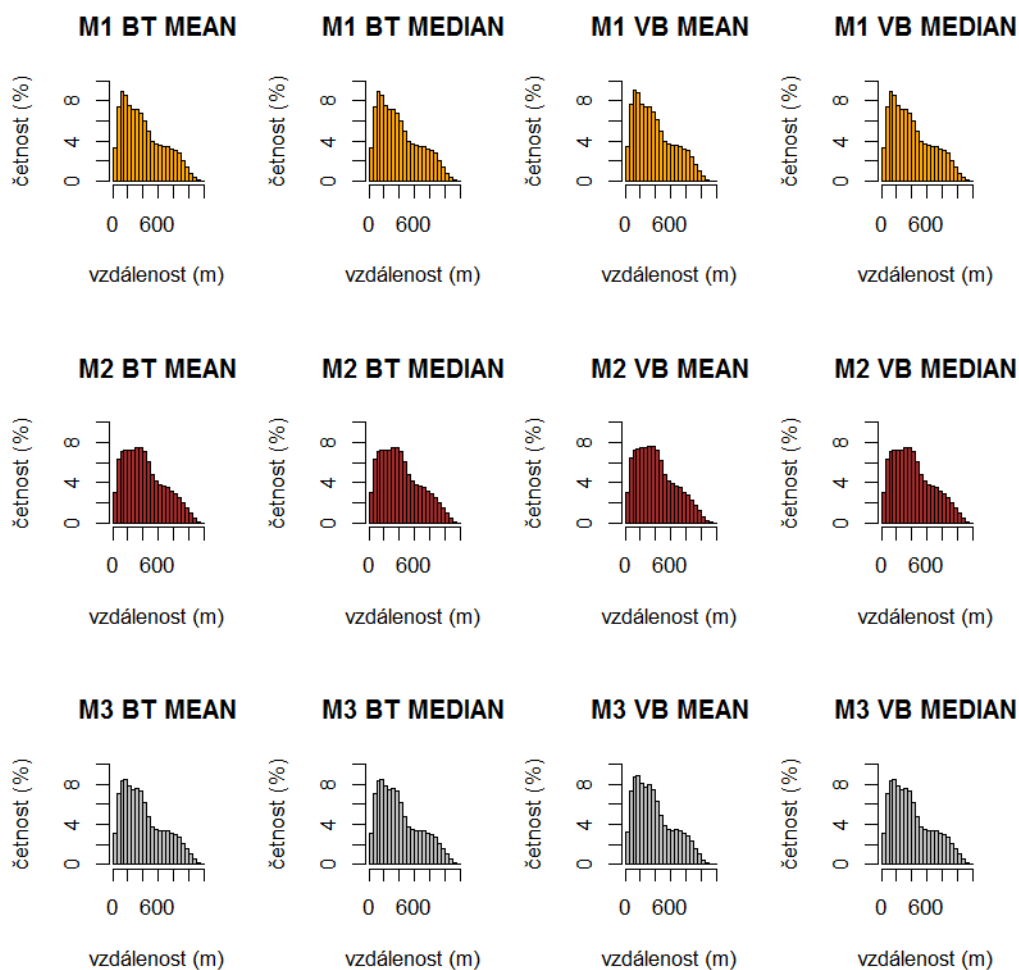
		20			10		
		nádrž	známé body	pokryto %	nádrž	známé body	pokryto %
M1	VB	547	405	74.04	2155	1016	47.15
	BT	547	407	74.41	2155	1029	47.75
M2	VB	547	429	78.43	2155	1193	55.36
	BT	547	435	79.52	2155	1215	56.38
M3	VB	547	422	77.15	2155	1066	49.47
	BT	547	430	78.61	2155	1092	50.67

		5			2		
		nádrž	známé body	pokryto %	nádrž	známé body	pokryto %
M1	VB	8615	2381	27.64	53894	5427	10.07
	BT	8615	2418	28.07	53894	5531	10.26
M2	VB	8615	2910	33.78	53894	6653	12.34
	BT	8615	2966	34.43	53894	6799	12.62
M3	VB	8615	2527	29.33	53894	5785	10.73
	BT	8615	2589	30.05	53894	5939	11.02

Tabulka 5: nádrž – celkový počet bodů na nádrži; známé body – body vstupující do interpolace; pokryto % - velikost pokrytí nádrže změřenými body

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M1 BT MEDIAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M1 VB MEAN 2	2	176.9	339.7	389.4	569.9	1188
M1 VB MEDIAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M2 BT MEAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 BT MEDIAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 VB MEAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 VB MEDIAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M3 BT MEAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 BT MEDIAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 VB MEAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 VB MEDIAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198

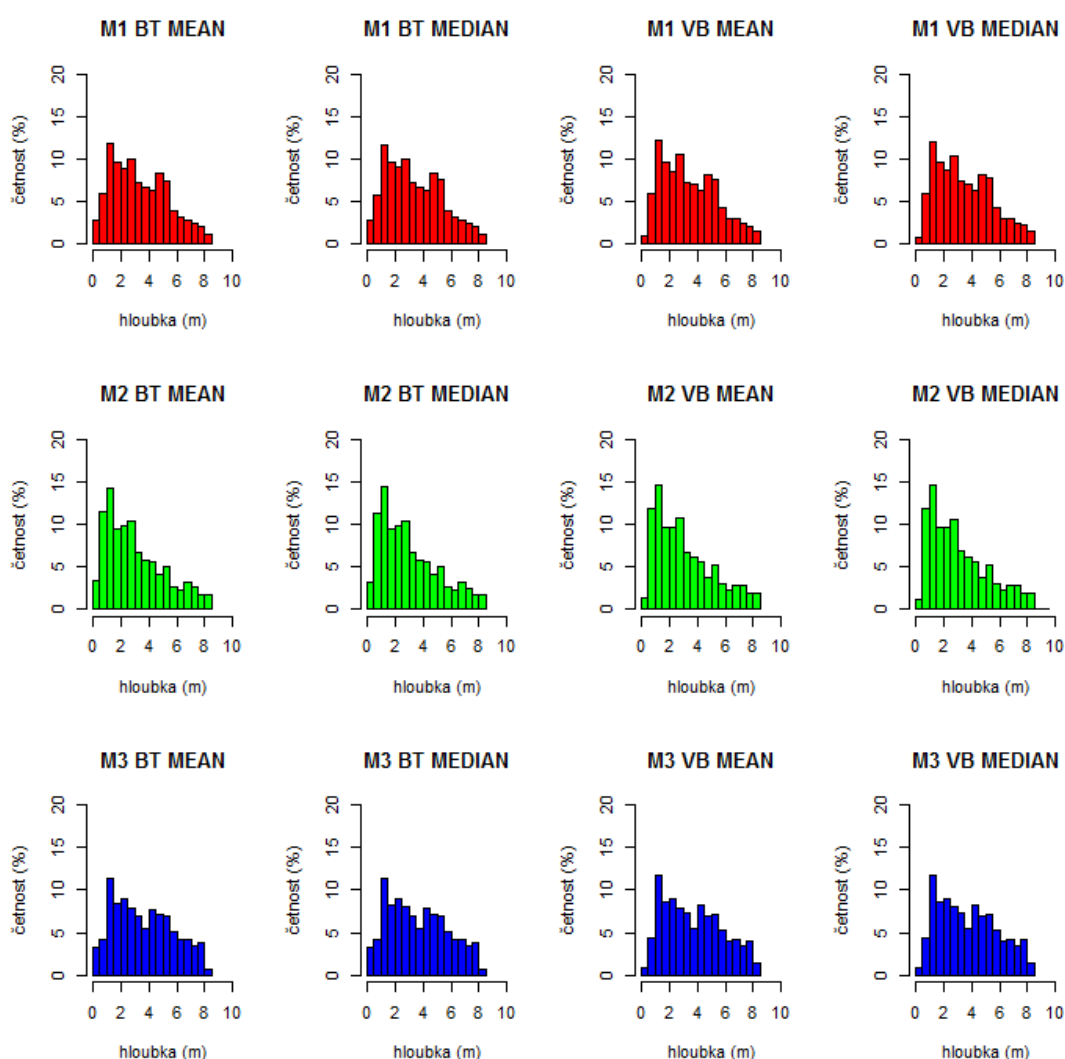
Tabulka 6: Sumarizace vzdáleností vstupních dat pro rozlišení 2m



Obrázek 17: Histogramy vzdáleností vstupních bodů pro 2m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 2	0.11	1.74	3.06	3.401	4.86	8.28
M1 BT MEDIAN 2	0.22	1.75	3.07	3.408	4.87	8.28
M1 VB MEAN 2	0.01393	1.82	3.14	3.48	4.91	8.35
M1 VB MEDIAN 2	0.39	1.83	3.15	3.488	4.915	8.35
M2 BT MEAN 2	0.07333	1.33	2.56	3.043	4.28	8.27
M2 BT MEDIAN 2	0.21	1.34	2.57	3.05	4.29	8.27
M2 VB MEAN 2	0.1864	1.39	2.63	3.115	4.36	8.4
M2 VB MEDIAN 2	0.39	1.4	2.64	3.123	4.37	9.4
M3 BT MEAN 2	0.035	1.864	3.385	3.66	5.28	8.22
M3 BT MEDIAN 2	0.21	1.89	3.4	3.667	5.28	8.22
M3 VB MEAN 2	0.0173	1.97	3.53	3.77	5.35	8.34
M3 VB MEDIAN 2	0.39	1.98	3.53	3.778	5.36	8.34

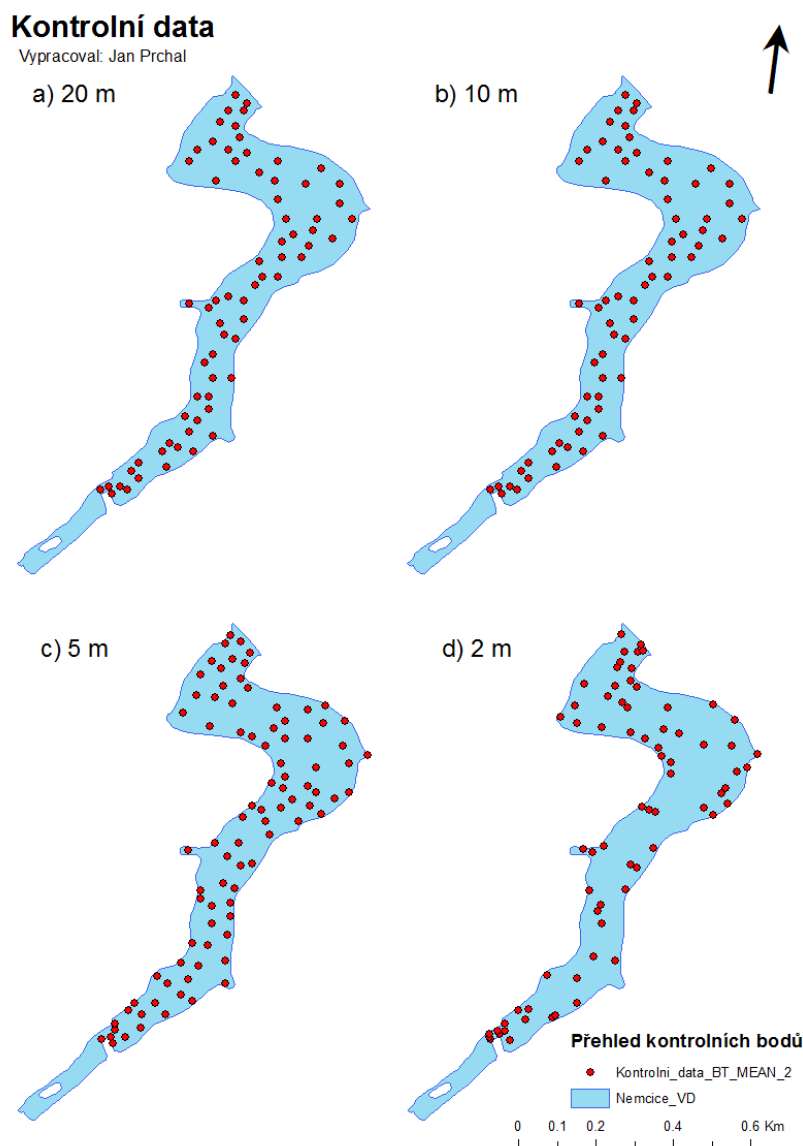
Tabulka 7: Sumarizace hloubek vstupních dat pro rozlišení 2m



Obrázek 18 Histogramy hloubek pro 2m rozlišení

5.2. Kontrolní data

Tato část práce je věnována kontrolním datům. Rozmístění dat pro různá rozlišení je zobrazeno na jednoduchém polygonu nádrže. Data jsou dále statisticky zhodnocena a pro různá rozlišení jsou vytvořeny histogramy hloubek kontrolních dat.



Obrázek 19: Kontrolní data: a) 20 m; b) 10 m; c) 5 m; d) 2 m

Kontrola dat proběhla na základě Cross-Validace, kdy byla vytvořena sada kontrolních dat, náhodným výběrem z dat vstupujících do interpolace (Obrázek 19). Tyto kontrolní data byly z dat vstupních vyjmuty a po provedení interpolace byly hodnoty kontrolních dat porovnávány s výsledným rastrem (Kohavi 2001). Z výsledného rozdílu mezi změřenými a simulovanými daty byla za použití výpočtu

RMSE hodnocena chybovost daných metod. Pro jednotlivá rozlišení jsou u každého měření vždy stejné souřadnice kontrolních bodů. Počet kontrolních bodů u jednotlivých rozlišení není konstantní (*Tabulka 8*). U rozlišení 20 m bylo vybráno v průměru 6,9% bodů, rozlišení 10 m 5,97%, rozlišení 5 m 3,32% a pro rozlišení 2 m 1,2%. Průměrná hloubka kontrolních dat činí 3,4 m. Dále je zobrazena tabulka sumarizací kontrolních bodů a sumarizace s histogramy hloubek pro rozlišení 2 m (*Tabulka 9 a Obrázek 20*). Ostatní rozlišení jsou zobrazena v příloze (*Tabulka 27 – 30 a Obrázek 53 -Obrázek 56*).

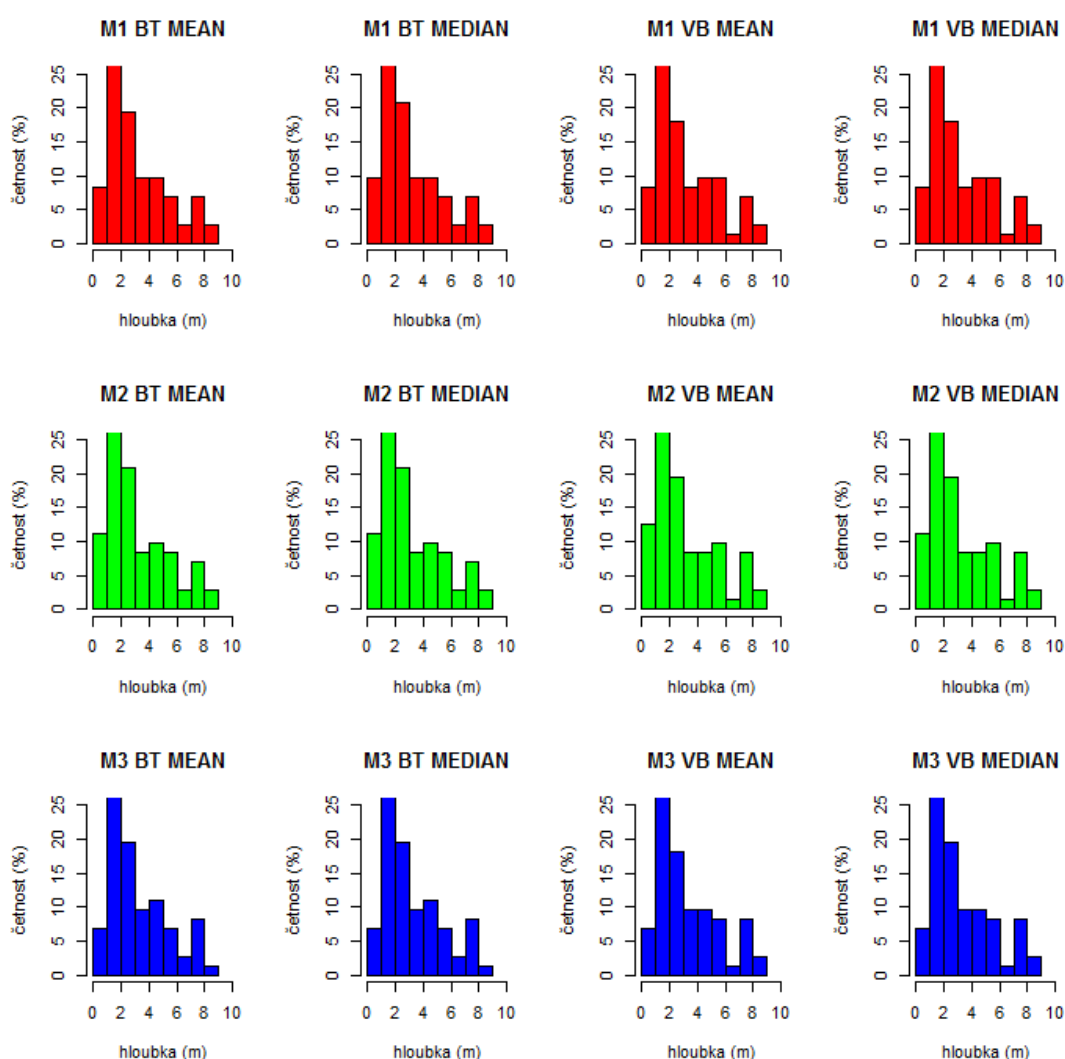
	20			10		
	měřené body	kontrolní body	pokryto %	měřené body	kontrolní body	pokryto %
M1	405	31	7.11	1016	69	6.36
M2	429	31	6.74	1193	69	5.47
M3	422	31	6.84	1066	69	6.08

	5			2		
	měřené body	kontrolní body	pokryto %	měřené body	kontrolní body	pokryto %
M1	2381	89	3.60	5427	72	1.31
M2	2910	89	2.97	6653	72	1.07
M3	2527	89	3.40	5785	72	1.23

Tabulka 8: měřené body - body vstupující do interpolace; kontrolní body – vybrané kontrolní body; pokryto % - procentuální zastoupení kontrolních bodů v bodech měřených

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 2	0.5833	1.32	2.232	3.073	4.577	8.27
M1 BT MEDIAN 2	0.59	1.327	2.235	3.082	4.577	8.27
M1 VB MEAN 2	0.5633	1.327	2.2	3.084	4.677	8.4
M1 VB MEDIAN 2	0.57	1.327	2.225	3.089	4.677	8.4
M2 BT MEAN 2	0.56	1.248	2.235	3.033	4.55	8.3
M2 BT MEDIAN 2	0.56	1.248	2.235	3.039	4.55	8.3
M2 VB MEAN 2	0.55	1.245	2.215	3.068	4.635	8.42
M2 VB MEDIAN 2	0.55	1.245	2.23	3.076	4.635	8.42
M3 BT MEAN 2	0.5044	1.347	2.287	3.079	4.57	8.13
M3 BT MEDIAN 2	0.5	1.347	2.355	3.09	4.57	8.13
M3 VB MEAN 2	0.4756	1.288	2.275	3.108	4.87	8.35
M3 VB MEDIAN 2	0.52	1.288	2.31	3.117	4.87	8.35

Tabulka 9: Sumarizace kontrolních dat pro rozlišení 2 m.



Obrázek 20: Histogramy kontrolních dat pro rozlišení 2m

5.3. Nastavení interpolačních metod

Za účelem vytvoření povrchu dna nádrže a hodnocení pohybu sedimentů, byla naměřená data interpolována různými interpolačními metodami. Interpolace byly realizovány pomocí metod z kapitoly 4.1. *Odhad batymetrie*. Účinnost interpolačních metod byla analyzována na všech třech měřeních rozdělených podle jednotlivých rozlišení rastru. Vstupní parametry byly specifikovány jednotlivě pro každou metodu (Tabulka 10). Metody Thiessenových polygonů, TIN a Natural Neighbor pracovali se vstupními daty bez nastavení. Zvolil jsem pro ně pouze rozlišení výstupního rastru.

Metoda:	Rastr:	Parametry:	Nastavení:	
IDW	20; 10; 5; 2	počet vstupních bodů	6	
		power	2	
SPLINE	10; 5; 2	weight	0.1	
		spline type	TENSION	
		počet vstupních bodů	12	
		20	počet vstupních bodů	20
KRIGING	20; 10; 5; 2	Kriging method	Ordinary	
		vlastnosti semivariogramu	Spherical	
		vstupní body	6	
KRIGING	20; 10; 5; 2	Kriging method	Ordinary	
		vlastnosti semivariogramu	Exponential	
		vstupní body	6	
KRIGING	20	Kriging method	Universal	
		vlastnosti semivariogramu	Quadratic drift	
		vstupní body	40	
		10	vstupní body	20
		5	vstupní body	50
		2	vstupní body pro M2	100
		2	vstupní body	100
2	vstupní body pro M2	150		
KRIGING	20	Kriging method	Universal	
		vlastnosti semivariogramu	Linear drift	
		vstupní body	20	
		10	vstupní body	12
		5	vstupní body	20
		2	vstupní body	50

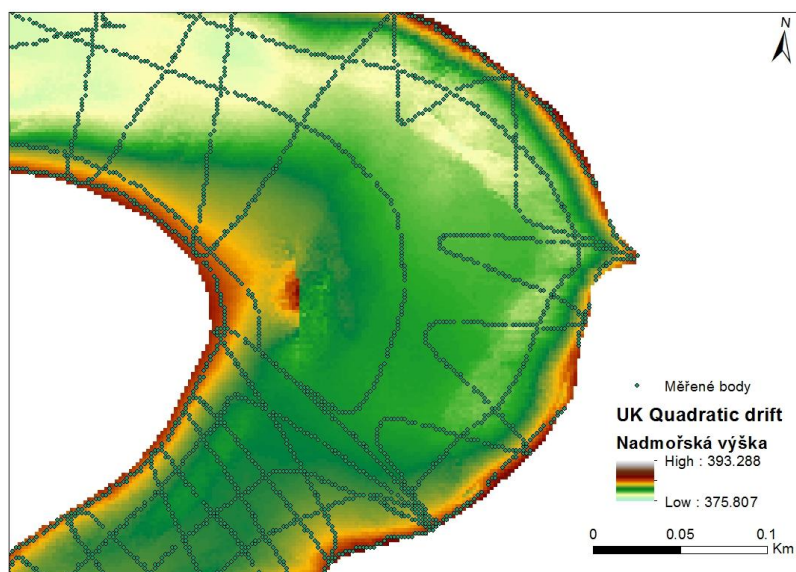
Tabulka 10: Nastavení parametrů metod IDW, SPLINE a Ordinary/Universal KRIGING

Určení počtu vstupních bodů velice ovlivňuje výsledky interpolací. Je snaha určit vzdálenost, při které stále existují vztahy mezi známými body. Otázkou zůstává, zda minimální vzdálenost určí dostatek bodů pro interpolaci neznámých hodnot.

Vzhledem k tvaru a členitosti nádrže byla zvolena metoda výběru konkrétního počtu okolních bodů vstupujících do interpolace bez přihlídnutí k anizotropii nádrže. Metodu výběru vstupních bodů s přihlídnutím k anizotropii nádrže například zvolil Šiljeg, 2015 u mapování dna na Chorvatském jezeře Vrana. Jezero se vyznačuje pravidelným tvarem i pravidelným reliéfem dna.

U metody IDW byla pro všechna rozlišení ponechána stejná hodnota, která se ukázala pro danou metodu jako nejvhodnější. Exponent vzdálenosti, který ovlivňuje význam okolních bodů na interpolovanou hodnotu, byl zvolen jako hodnota 2. Čím vyšší hodnota, tím menší je vliv ze vzdálenějších bodů. Pro metodu SPLINE byl ponechána defaultní hodnota vstupních bodů u všech měření v rozlišení 10, 5 a 2 metry. U rastru 20 metrů bylo nutné nastavit větší počet vstupních bodů. Při nižších hodnotách se již při vizuální kontrole výstupu vyskytly chybné údaje v místech, kde tyto hodnoty nejsou předpokládány. Jako typ splajny byla zvolena Splajna s tenzí. Volbou tenze pozměníme minimalizační kritéria, takže podmínky první derivace jsou začleněny do minimalizačních kritérií. Tak dosáhneme toho, že výsledná splajna není příliš vyhlazena a lze tedy metodu použít nejen pro málo členité povrchy (Mitasova a Mitas 1988).

Geostatistická metoda jako je kriging má složitější proces jelikož je zapotřebí vytvořit semivariogram (Šiljeg 2015). U Ordinary Kriging (OK) spherical a OK exponential byla hodnota vstupních bodů nastavena vždy stejně. Změna této hodnoty nepřispívá ke zlepšení kvality interpolace. Pro metodu Universal Kriging, používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu, bylo potřeba nastavit rozsah vstupních bodů výrazně větší. Bylo to dáno především individualitou jednotlivých měření. Při nízkém počtu vstupních bodů dochází k velkým chybám v místech, kde byl větší nedostatek měřených dat. Nejvíce se tato chyba projevila na druhém měření (Obrázek 21). U metody UK, používající lineární rovnici k popisu semivariogramu, podobný problém nenastal, proto byly nastaveny stejné hodnoty pro všechna rozlišení rastru.



Obrázek 21: Chyba interpolace u metody Universal Kriging používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu (Vypracoval: Jan Prchal)

5.4. Vyhodnocení chyb

Chyby byly posuzovány na základě Cross-validace, kdy byly body v určitých místech vyjmuty ze vstupních dat a po provedení interpolace byly tyto známě body porovnány s odhadnutými. Výstupem byla určitá chyba metody v konkrétních místech. Vyhodnocení dat probíhá na základě střední kvadratické chyby RMS (4.3.3. *RMSE*) a střední absolutní chyby MAE (4.3.4. MAE). Byly vybrány nejlepší metody a nejlepší sady dat.

		BT ME	BT MED	VB ME	VB MED	PRUM							
		BT ME	BT MED	VB ME	VB MED	PRUM	BT ME	BT MED	VB ME	VB MED	PRUM		
M1	20m	KRIG 1	6.557	7.062	6.558	7.036	6.803	10m	3.292	3.175	3.363	3.187	3.254
		KRIG 2	6.528	7.033	6.529	7.007	6.774		3.286	3.169	3.356	3.181	3.248
		KRIG 3	0.101	0.482	0.138	0.342	0.266		1.201	1.461	1.116	1.423	1.300
		KRIG 4	4.322	4.841	4.318	4.820	4.575		1.992	1.885	2.074	1.885	1.959
		IDW	4.915	5.395	4.912	5.351	5.143		2.385	2.269	2.446	2.276	2.344
		NN	1.865	2.313	1.861	2.243	2.071		1.304	1.182	1.352	1.158	1.249
		SPLINE	4.591	5.112	4.585	5.106	4.848		0.057	0.231	0.039	0.248	0.144
		THIESS	0.017	0.449	0.103	0.285	0.213		1.018	0.930	1.085	0.947	0.995
		TIN	0.923	1.360	0.891	1.278	1.113		1.059	0.908	1.100	0.862	0.983
PRUM	3.313	3.783	3.322	3.719	3.534	PRUM	1.733	1.690	1.770	1.685	1.720		
M1	5m	KRIG 1	2.396	2.283	2.422	2.252	2.338	2m	0.487	0.474	0.523	0.450	0.483
		KRIG 2	2.393	2.280	2.419	2.250	2.335		0.487	0.474	0.523	0.450	0.483
		KRIG 3	0.540	0.446	0.547	0.414	0.487		0.477	0.464	0.464	0.408	0.453
		KRIG 4	2.039	1.939	2.073	1.948	2.000		2.851	2.840	2.846	2.791	2.832
		IDW	1.459	1.345	1.492	1.317	1.403		0.387	0.387	0.316	0.257	0.337
		NN	0.609	0.503	0.677	0.509	0.574		0.414	0.418	0.413	0.365	0.402
		SPLINE	0.127	0.249	0.041	0.123	0.135		0.238	0.276	0.146	0.117	0.194
		THIESS	1.743	1.711	1.798	1.787	1.760		0.721	0.705	0.498	0.460	0.596
		TIN	0.968	0.881	1.055	0.944	0.962		0.540	0.538	0.535	0.467	0.520
PRUM	1.364	1.293	1.391	1.283	1.333	PRUM	0.733	0.731	0.696	0.641	0.700		
M2	20m	KRIG 1	6.848	7.070	6.853	7.042	6.953	10m	3.460	3.376	3.478	3.414	3.432
		KRIG 2	6.820	7.041	6.824	7.014	6.925		3.455	3.371	3.472	3.409	3.427
		KRIG 3	0.583	0.675	0.603	0.628	0.622		0.094	0.262	0.037	0.123	0.129
		KRIG 4	5.536	5.836	5.533	5.791	5.674		2.098	2.012	2.107	2.074	2.073
		IDW	5.253	5.431	5.255	5.384	5.331		2.760	2.717	2.756	2.757	2.748
		NN	2.716	2.863	2.706	2.781	2.767		1.548	1.516	1.527	1.562	1.538
		SPLINE	6.061	6.211	6.082	6.198	6.138		0.854	0.861	0.837	0.902	0.864
		THIESS	1.584	1.735	1.618	1.735	1.668		0.422	0.387	0.351	0.385	0.386
		TIN	2.100	2.320	2.081	2.267	2.192		1.414	1.356	1.436	1.394	1.400
PRUM	4.167	4.353	4.173	4.316	4.252	PRUM	1.789	1.762	1.778	1.780	1.777		
M2	5m	KRIG 1	2.538	2.578	2.330	2.327	2.443	2m	0.482	0.438	0.844	0.711	0.619
		KRIG 2	2.536	2.576	2.328	2.325	2.441		0.112	0.088	0.486	0.386	0.268
		KRIG 3	0.660	0.709	0.574	0.587	0.633		0.596	0.562	0.821	0.787	0.691
		KRIG 4	1.958	2.003	1.887	1.912	1.940		2.507	2.482	2.707	2.675	2.593
		IDW	1.725	1.767	1.611	1.577	1.670		0.213	0.188	0.572	0.470	0.361
		NN	0.642	0.682	0.574	0.550	0.612		0.209	0.180	0.563	0.456	0.352
		SPLINE	0.044	0.057	0.007	0.059	0.042		0.029	0.045	0.375	0.250	0.175
		THIESS	1.377	1.413	1.265	1.281	1.334		0.043	0.104	0.144	0.316	0.152
		TIN	1.031	1.063	0.965	0.940	1.000		0.269	0.238	0.604	0.557	0.417
PRUM	1.390	1.428	1.282	1.284	1.346	PRUM	0.496	0.481	0.791	0.734	0.625		
M3	20m	KRIG 1	6.571	6.875	6.596	6.850	6.723	10m	3.413	3.384	3.561	3.455	3.453
		KRIG 2	6.544	6.848	6.568	6.822	6.695		3.408	3.380	3.556	3.450	3.448
		KRIG 3	0.239	0.505	0.270	0.358	0.343		1.853	1.791	1.961	1.825	1.857
		KRIG 4	5.842	6.226	5.852	6.184	6.026		2.112	2.065	2.248	2.122	2.137
		IDW	4.978	5.247	4.992	5.180	5.099		2.876	2.878	2.974	2.892	2.905
		NN	2.469	2.712	2.478	2.597	2.564		1.538	1.547	1.618	1.542	1.561
		SPLINE	5.061	5.393	5.066	5.361	5.220		0.610	0.651	0.686	0.634	0.646
		THIESS	0.597	0.738	0.653	0.826	0.703		1.415	1.387	1.400	1.305	1.377
		TIN	1.749	2.038	1.751	1.981	1.880		1.098	1.073	1.216	1.113	1.125
PRUM	3.783	4.065	3.803	4.018	3.917	PRUM	2.036	2.017	2.136	2.038	2.057		
M3	5m	KRIG 1	3.051	3.099	3.053	3.049	3.063	2m	0.427	0.443	0.508	0.494	0.468
		KRIG 2	3.047	3.095	3.050	3.045	3.059		0.427	0.442	0.508	0.494	0.468
		KRIG 3	0.739	0.771	0.714	0.720	0.736		0.770	0.791	0.886	0.885	0.833
		KRIG 4	1.741	1.769	1.716	1.732	1.740		2.965	2.991	3.059	3.067	3.020
		IDW	2.115	2.157	2.160	2.121	2.138		0.194	0.205	0.268	0.254	0.230
		NN	1.018	1.084	1.113	1.054	1.067		0.380	0.353	0.650	0.550	0.483
		SPLINE	0.253	0.315	0.371	0.282	0.305		0.099	0.113	0.116	0.102	0.107
		THIESS	0.994	1.133	0.952	1.136	1.054		0.143	0.176	0.135	0.146	0.150
		TIN	1.144	1.210	1.250	1.226	1.208		0.514	0.498	0.589	0.544	0.536
PRUM	1.567	1.626	1.598	1.596	1.597	PRUM	0.657	0.668	0.746	0.726	0.700		

Tabulka 11: Přehled chyb RMSE, vyznačeny jsou nejlepší metody pro konkrétní měření a sadu dat

		BT ME	BT MED	VB ME	VB MED	PRUM						BT ME	BT MED	VB ME	VB MED	PRUM
M1	20m	KRIG 1	1,178	1,268	1,178	1,264	1,222	10m	0,396	0,382	0,405	0,384	0,392			
		KRIG 2	1,172	1,263	1,173	1,258	1,217		0,396	0,382	0,404	0,383	0,391			
		KRIG 3	0,018	0,087	0,025	0,062	0,048		0,145	0,176	0,134	0,171	0,157			
		KRIG 4	0,776	0,870	0,775	0,866	0,822		0,240	0,227	0,250	0,227	0,236			
		IDW	0,883	0,969	0,882	0,961	0,924		0,287	0,273	0,294	0,274	0,282			
		NN	0,335	0,415	0,334	0,403	0,372		0,157	0,142	0,163	0,139	0,150			
		SPLINE	0,825	0,918	0,823	0,917	0,871		0,007	0,028	0,005	0,030	0,017			
		THIESS	0,003	0,081	0,018	0,051	0,038		0,122	0,112	0,131	0,114	0,120			
		TIN	0,166	0,244	0,160	0,230	0,200		0,128	0,109	0,132	0,104	0,118			
PRUM	0,595	0,679	0,597	0,668	0,635	PRUM	0,209	0,203	0,213	0,203	0,207					
M1	5m	KRIG 1	0,254	0,242	0,257	0,239	0,248	2m	0,057	0,056	0,062	0,011	0,047			
		KRIG 2	0,254	0,242	0,256	0,238	0,248		0,057	0,056	0,062	0,053	0,057			
		KRIG 3	0,057	0,047	0,058	0,044	0,052		0,056	0,055	0,055	0,048	0,053			
		KRIG 4	0,216	0,206	0,220	0,206	0,212		0,336	0,335	0,335	0,329	0,334			
		IDW	0,155	0,143	0,158	0,140	0,149		0,046	0,046	0,037	0,030	0,040			
		NN	0,065	0,053	0,072	0,054	0,061		0,049	0,049	0,049	0,043	0,047			
		SPLINE	0,013	0,026	0,004	0,013	0,014		0,028	0,033	0,017	0,014	0,023			
		THIESS	0,185	0,181	0,191	0,189	0,187		0,085	0,083	0,059	0,054	0,070			
		TIN	0,103	0,093	0,112	0,100	0,102		0,064	0,063	0,063	0,055	0,061			
PRUM	0,145	0,137	0,147	0,136	0,141	PRUM	0,086	0,086	0,082	0,071	0,081					
M2	20m	KRIG 1	0,262	1,270	1,231	1,265	1,007	10m	0,417	0,406	0,419	0,411	0,413			
		KRIG 2	1,225	1,265	1,226	1,260	1,244		0,416	0,406	0,418	0,410	0,413			
		KRIG 3	0,105	0,121	0,108	0,113	0,112		0,011	0,032	0,004	0,015	0,016			
		KRIG 4	0,994	1,048	0,994	1,040	1,019		0,253	0,242	0,254	0,250	0,250			
		IDW	0,944	0,975	0,944	0,967	0,957		0,332	0,327	0,332	0,332	0,331			
		NN	0,488	0,514	0,486	0,500	0,497		0,186	0,183	0,184	0,188	0,185			
		SPLINE	1,089	1,115	1,092	1,113	1,102		0,103	0,104	0,101	0,109	0,104			
		THIESS	0,285	0,312	0,291	0,312	0,300		0,051	0,047	0,042	0,046	0,046			
		TIN	0,377	0,417	0,374	0,407	0,394		0,170	0,163	0,173	0,168	0,169			
PRUM	0,641	0,782	0,749	0,775	0,737	PRUM	0,215	0,212	0,214	0,214	0,214					
M2	5m	KRIG 1	0,044	0,273	0,247	0,247	0,203	2m	0,057	0,052	0,099	0,084	0,073			
		KRIG 2	0,269	0,273	0,247	0,246	0,259		0,013	0,010	0,057	0,045	0,032			
		KRIG 3	0,070	0,075	0,061	0,062	0,067		0,070	0,066	0,097	0,093	0,081			
		KRIG 4	0,208	0,212	0,200	0,203	0,206		0,295	0,292	0,319	0,315	0,306			
		IDW	0,183	0,187	0,171	0,167	0,177		0,025	0,022	0,067	0,055	0,043			
		NN	0,068	0,072	0,061	0,058	0,065		0,025	0,021	0,066	0,054	0,041			
		SPLINE	0,005	0,006	0,001	0,006	0,004		0,003	0,005	0,044	0,029	0,021			
		THIESS	0,146	0,150	0,134	0,136	0,141		0,005	0,012	0,017	0,037	0,018			
		TIN	0,109	0,113	0,102	0,100	0,106		0,032	0,028	0,071	0,066	0,049			
PRUM	0,122	0,151	0,136	0,136	0,136	PRUM	0,058	0,057	0,093	0,087	0,074					
M3	20m	KRIG 1	1,180	1,235	1,185	1,230	1,207	10m	0,411	0,407	0,429	0,416	0,416			
		KRIG 2	1,175	1,230	1,180	1,225	1,203		0,410	0,407	0,428	0,415	0,415			
		KRIG 3	0,043	0,091	0,048	0,064	0,062		0,223	0,216	0,236	0,220	0,224			
		KRIG 4	1,049	1,118	1,051	1,111	1,082		0,254	0,249	0,271	0,255	0,257			
		IDW	0,894	0,942	0,897	0,930	0,916		0,346	0,346	0,358	0,348	0,350			
		NN	0,443	0,487	0,445	0,466	0,460		0,185	0,186	0,195	0,186	0,188			
		SPLINE	0,909	0,969	0,910	0,963	0,938		0,073	0,078	0,083	0,076	0,078			
		THIESS	0,107	0,133	0,117	0,148	0,126		0,170	0,167	0,169	0,157	0,166			
		TIN	0,314	0,366	0,314	0,356	0,338		0,132	0,129	0,146	0,134	0,135			
PRUM	0,679	0,730	0,683	0,722	0,704	PRUM	0,245	0,243	0,257	0,245	0,248					
M3	5m	KRIG 1	0,323	0,329	0,324	0,323	0,325	2m	0,050	0,052	0,060	0,058	0,055			
		KRIG 2	0,323	0,328	0,323	0,323	0,324		0,050	0,052	0,060	0,058	0,055			
		KRIG 3	0,078	0,082	0,076	0,076	0,078		0,091	0,093	0,104	0,104	0,098			
		KRIG 4	0,185	0,188	0,182	0,184	0,184		0,349	0,353	0,360	0,361	0,356			
		IDW	0,224	0,229	0,229	0,225	0,227		0,023	0,024	0,032	0,030	0,027			
		NN	0,108	0,115	0,118	0,112	0,113		0,045	0,042	0,077	0,065	0,057			
		SPLINE	0,027	0,033	0,039	0,030	0,032		0,012	0,013	0,014	0,012	0,013			
		THIESS	0,105	0,120	0,101	0,120	0,112		0,017	0,021	0,016	0,017	0,018			
		TIN	0,121	0,128	0,132	0,130	0,128		0,061	0,059	0,069	0,064	0,063			
PRUM	0,166	0,172	0,169	0,169	0,169	PRUM	0,077	0,079	0,088	0,086	0,082					

Tabulka 12: Přehled chyb MAE, vyznačeny jsou nejlepší metody pro konkrétní měření a sadu dat jako pro RMSE

S klesajícím rozlišením rastru došlo ke zpřesnění odhadů a to u všech tří měření (Tabulka 11, Tabulka 12). Průměrný rozdíl chyb mezi rozlišením 20 a 2 m byl $RMSE = 3,226$ a u $MAE = 0,613$. Tento pokles byl dobře patrný na průměrných hodnotách chyb $RMSE$ a MAE u jednotlivých rastrů. Průměrné hodnoty $RMSE$ u všech tří měření byly pro rozlišení dvacet metrů 3,901, deset metrů 1,851, pět metrů 1,425 a pro rozlišení dva metry byla průměrná hodnota chyb 0,675. Průměrné hodnoty MAE taktéž získané pro všechny tři měření byla pro rastr dvacet metrů 0,692, deset metrů 0,223, pět metrů 0,149 a pro rozlišení dva metry 0,079. Při změně rozlišení z 20 m na 10 m došlo ke snížení průměrné chybovosti o 63%.

Nejmenší průměrná chybovost se vyskytla u dat měřených sadou čtyř paprsků (BT) (Tabulka 13). Hodnota jednoho pixelu byla vypočtena jako průměr ze všech hodnot ležících uvnitř tohoto pixelu nebo jako jejich střední hodnota. Tyto metody byly posuzovány vzhledem k faktu, že extrémní hodnoty (velké terénní nerovnosti) vstupních dat, ze kterých mohou průměr výrazně ovlivnit. Střední hodnotu tyto extrémy neovlivní. Jako vhodnější metoda vyšla metoda výpočtu průměru (MEAN) (Tabulka 14).

Průměrná chyba	BT	VB
RMSE	1,955	1,971
MAE	1,080	1,096

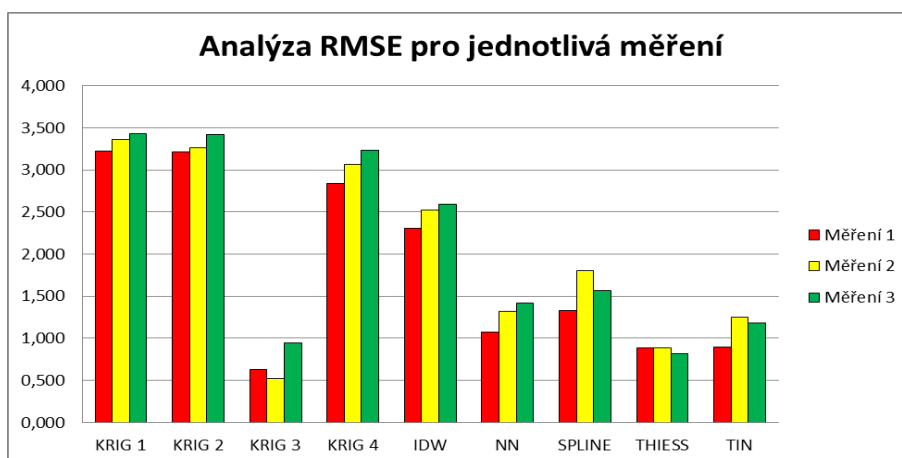
Tabulka 13: Srovnání chyb $RMSE$ a MAE u VB a BT

Průměrná chyba	BT MEAN	BT MEDIAN	VB MEAN	VB MEDIAN
RMSE	1,919	1,991	1,957	1,985
MAE	1,049	1,110	1,084	1,107

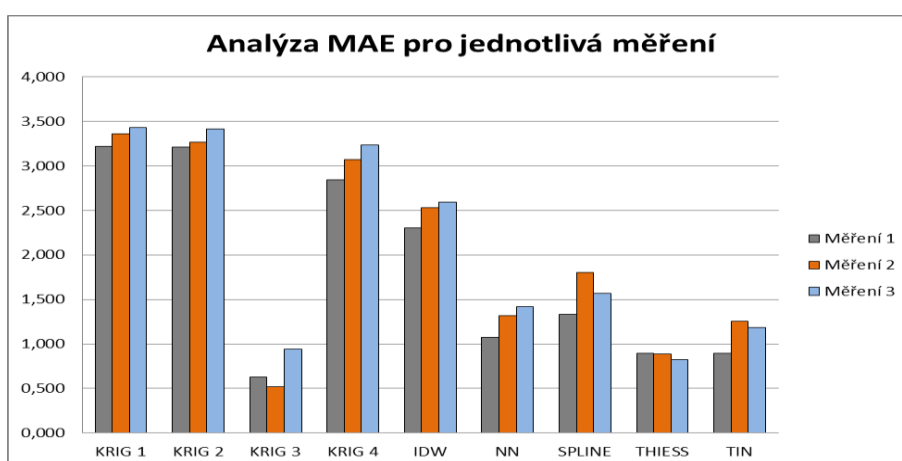
Tabulka 14: Srovnání chyb $RMSE$ a MAE průměru a střední hodnoty

Při celkovém hodnocení každého z měření bylo vybráno jako nejméně chybné první měření s průměrnou hodnotou $RMSE = 1,822$ a $MAE = 0,266$ (Obrázek 22, Obrázek 23). U analýzy jednotlivých rozlišení vyšla na základě chyb $RMSE$ i MAE jako nejvhodnější pro rozlišení 20 m metoda Universal Kriging používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu a pro rozlišení 10, 5 a 2 m Spline interpolace (Obrázek 24, Obrázek 25). Dále jako vůbec nejvhodnější měření hodnocené podle rozlišení dat bylo vybráno druhé měření pro rastr dva metry s průměrnou hodnotou $RMSE = 0,625$ a $MAE = 0,074$. Z tabulek 14

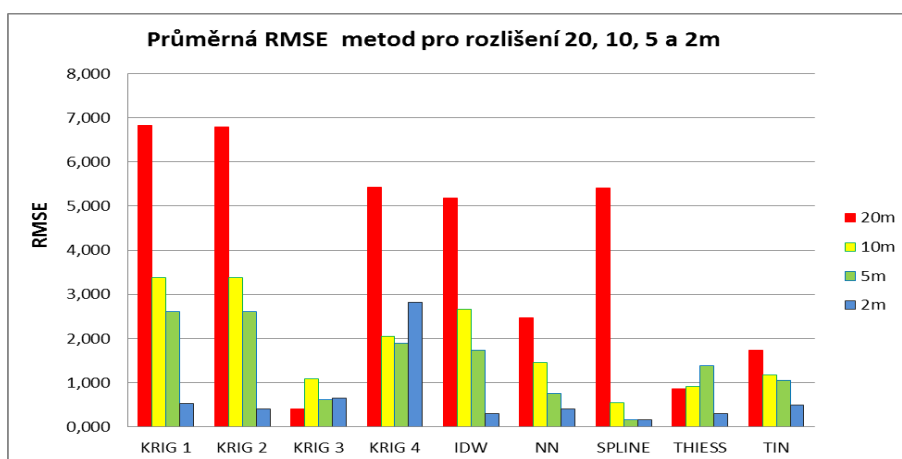
až 19 je patrné, že na základě vyhodnocení RMSE a MAE byla průměrně nejlépe hodnocená metoda Universal Kriging používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu (Obrázek 26, Obrázek 27).



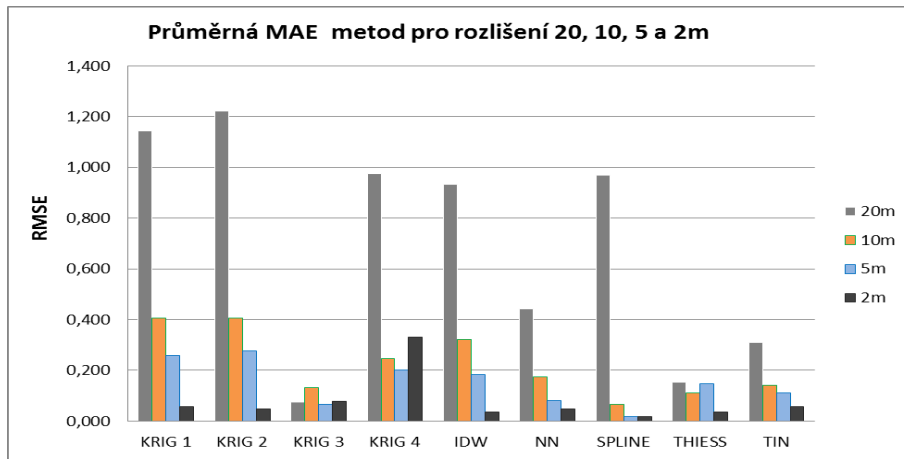
Obrázek 22: Analýza RMSE všech interpolačních metod pro jednotlivá měření



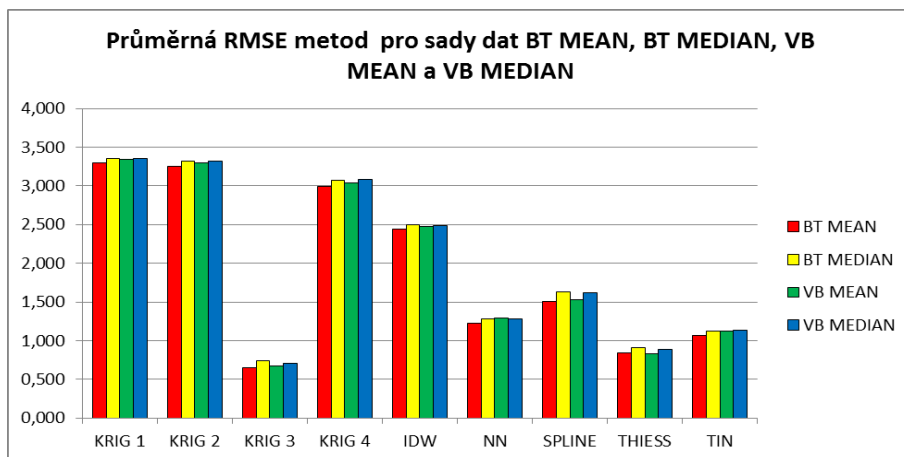
Obrázek 23: Analýza MAE všech interpolačních metod pro jednotlivá měření



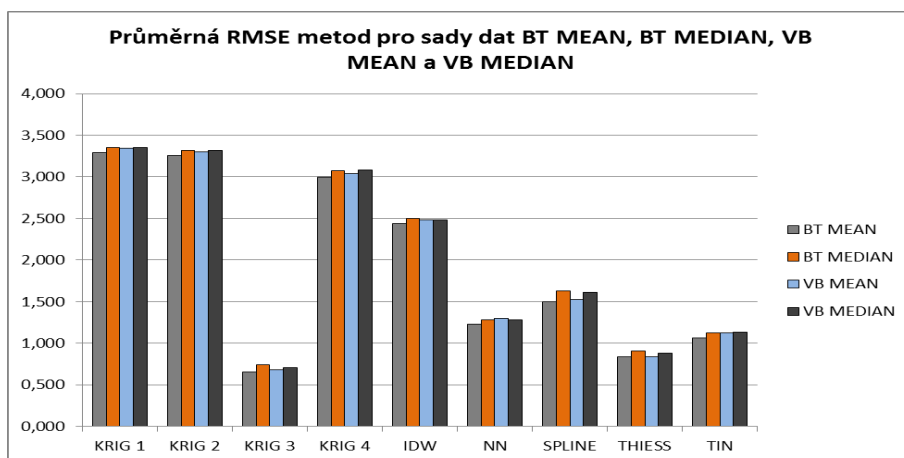
Obrázek 24: Chyba RMSE pro jednotlivá rozlišení



Obrázek 25: Chyba MAE pro jednotlivá rozlišení

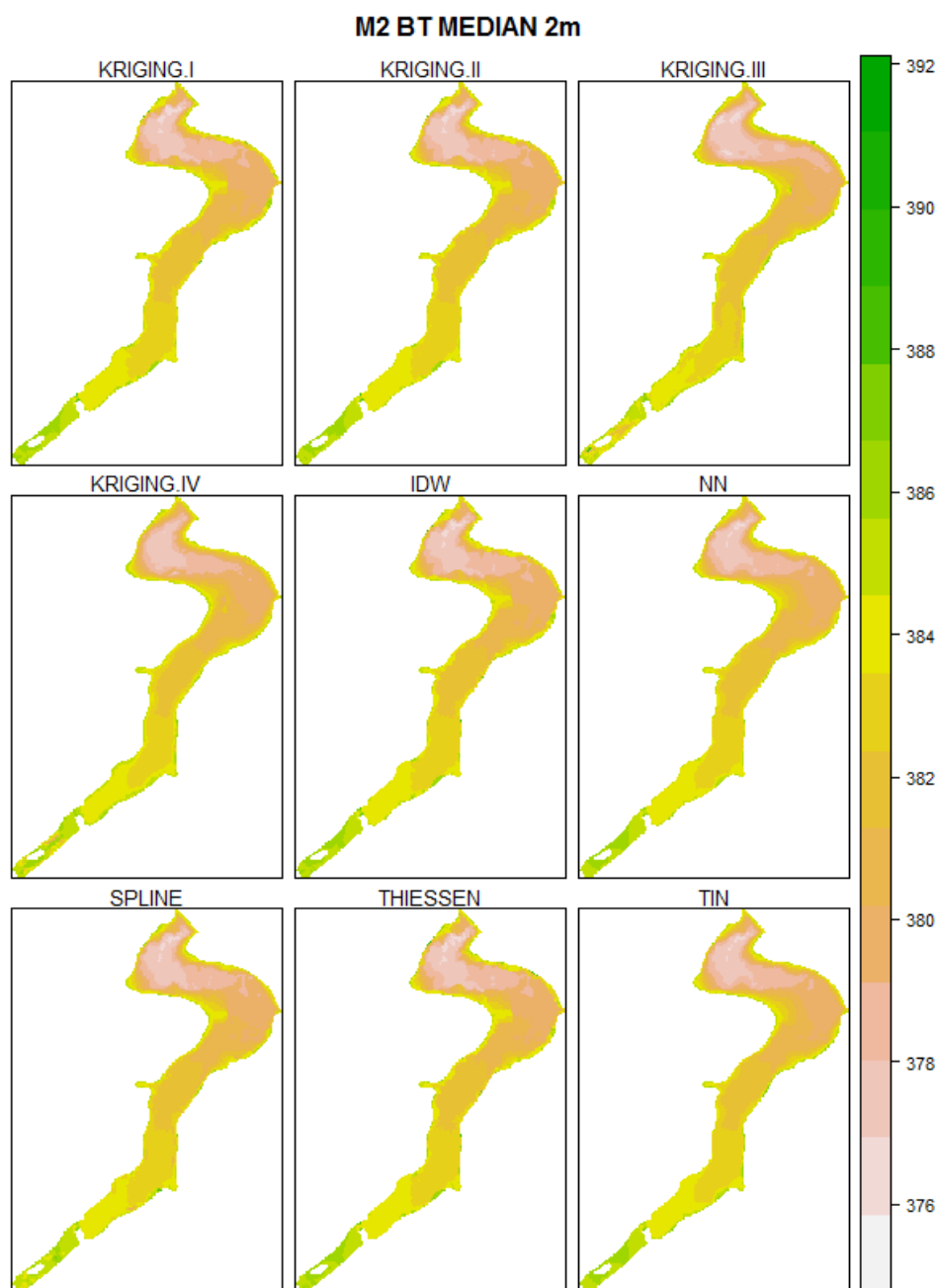


Obrázek 26: Analýza chyb RMSE pro sady dat BM Mean, BT Median, VB Mean a VB Median

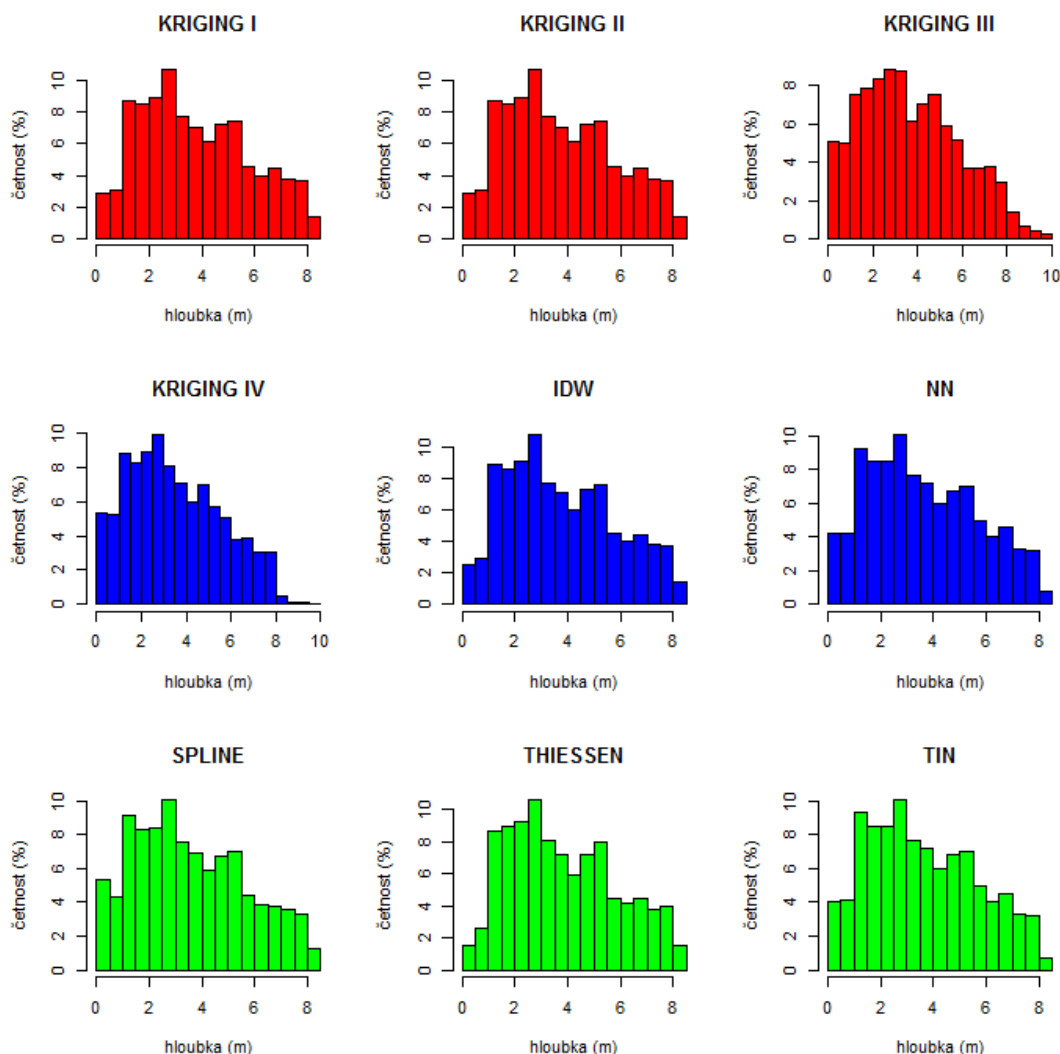


Obrázek 27: Analýza chyb MAE pro sady dat BM Mean, BT Median, VB Mean a VB Median

Sadou dat s celkově nejmenšími průměrnými hodnotami RMSE a MAE u všech měření byla sada získaná metodou Bottom-track. Obrázek 28 a Obrázek 29 zobrazují rastry a četnosti výskytu interpolovaných hloubek z této sady dat. Rastry a histogramy jednotlivých měření pro průměrně nejlépe hodnocenou sadu dat BT MEAN jsou zobrazeny v příloze (Obrázek 57 -Obrázek 68).



Obrázek 28: Přehled výsledných rastrů druhého měření Bottom-track Median pro rozlišení 2 m



Obrázek 29: Histogramy druhého měření Bottom.track Median pro rozlišení 2 m

5.5. Analýza vybrané metody

V této části práce je provedena základní analýza nejlépe hodnocené metody Spline s tenzí pro sadu dat měřenou pomocí BT MEAN. Jsou vyhodnoceny RMSE a MAE chyby interpolace a základní statistické údaje výsledného rastru. Dále je výsledný rastr porovnán s existující vrstevnicovou mapou a nakonec je vytvořen 3D model výsledného rastru.

Z hlediska RMSE a MEA byl vyhodnocen jako nejméně chybový rastr o rozlišení 2 metry interpolovaný metodou Spline s tenzí se vstupními daty měřenými pomocí sady čtyř paprsků a průměrováním hodnot spadajících do konkrétního pixelu. Hodnota RMSE pro tento rastr je 0,029, hodnota MAE = 0,003.

Vstupní hodnoty byly získané měřením pomocí sady čtyř paprsků Bottom-track a hodnota pro konkrétní pixel byla vypočtena jako průměr ze všech bodů ležících uvnitř pixelu. Maximální hloubka měřených dat je 8,27 m a průměrná hloubka je 3,04 m (Tabulka 15).

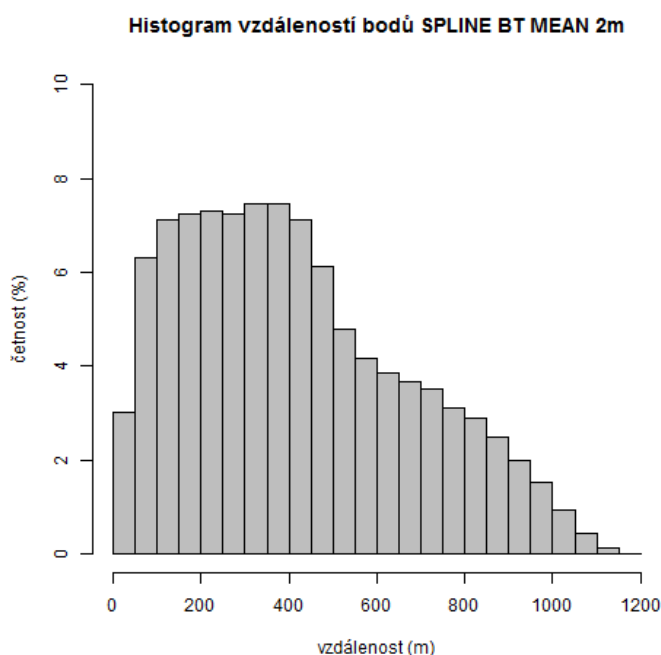
	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M2 BT MEAN 2	0,07333	1,33	2,56	3,043	4,28	8,27

Tabulka 15: Sumarizace měřených dat BT MEAN pro rozlišení 2 m

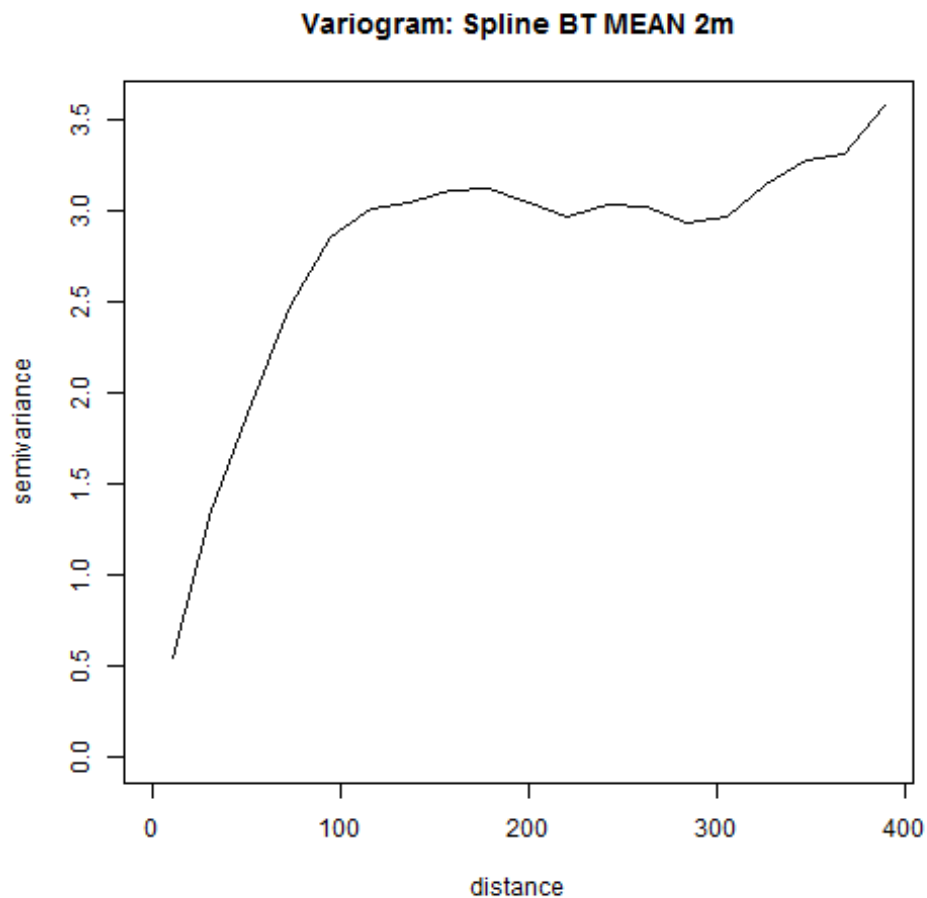
Vzdálenosti vstupních bodů se pohybují v rozmezí od 0 do 1190 m. Průměrná hodnota je 417,7 m (Tabulka 16). Z histogramu (Obrázek 30) je patrné, že se vzdáleností větší než je 400 m bude vliv autokorelace výrazně klesat. Vytvořený podrobnější variogram (Obrázek 31) byl vybrán tak, aby se nevyskytoval pokles semivariace. Vyriogram má následující parametry: Range = 130, Sill = 3,1 a Nugget = 0,1.

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M2 BT MEAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190

Tabulka 16: Sumarizace vzdáleností vstupních bodů



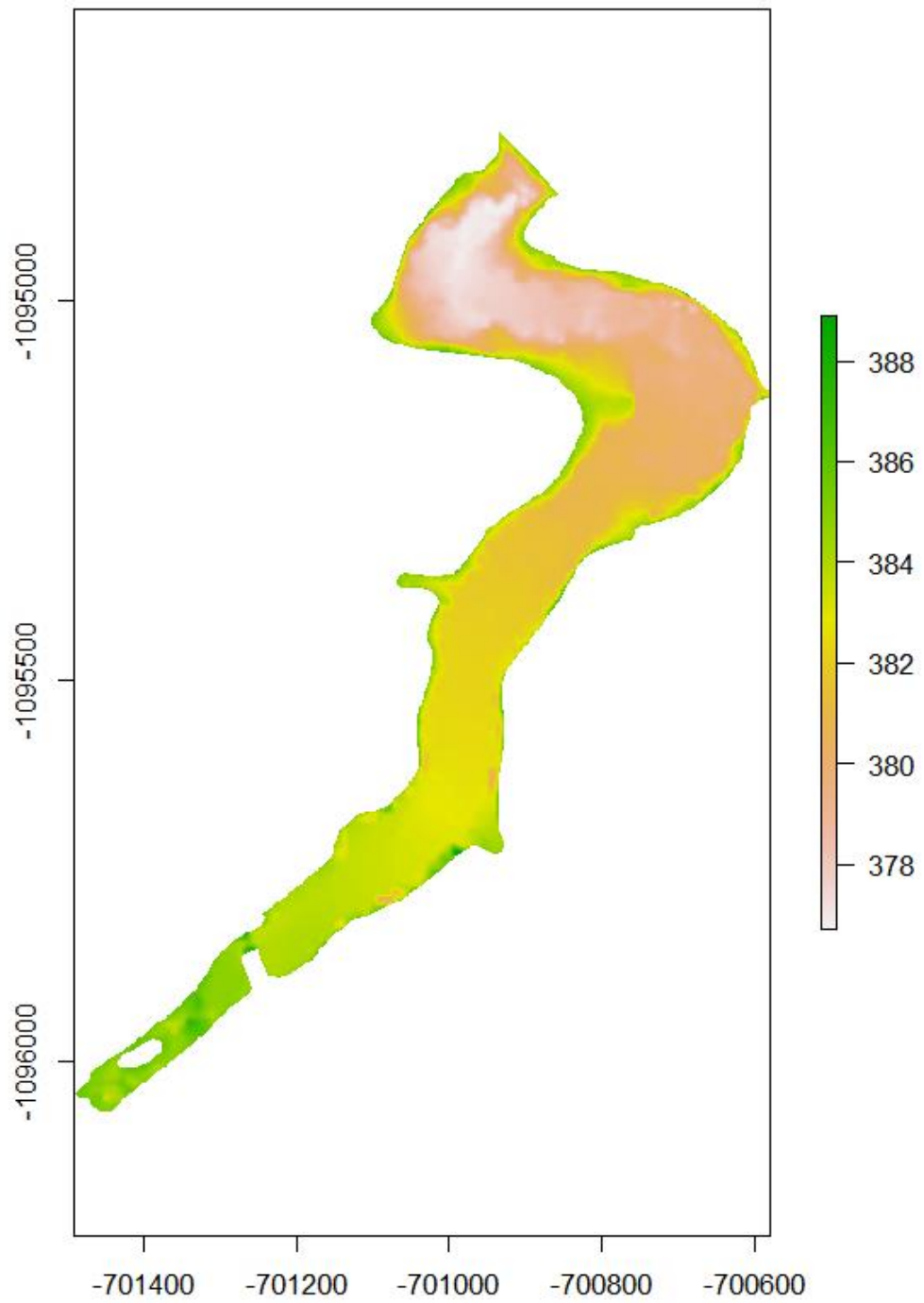
Obrázek 30: Histogram vzdáleností vstupních dat pro BT MEAN 2m



Obrázek 31: Variogram vzdáleností vstupních bodů BT MEAN; Range = 130; Sill = 3,1; Nugget = 0,1

Výsledný rastr nádrže je zobrazen na Obrázek 32. Z výstupu je patrné, že nádrž má pozvolný klesající trend ve směru od přítoku k hrázi. Model terénu nevykazoval výrazné terénní nerovnosti. Nejhlubší část se nachází v severní části nádrže, naopak nejmenší hloubka byla dle očekávání na přítoku nádrže, kde již během měření byla tato část nádrže výrazně zanesena sedimentem.

SPLINE Bottom-Track Mean

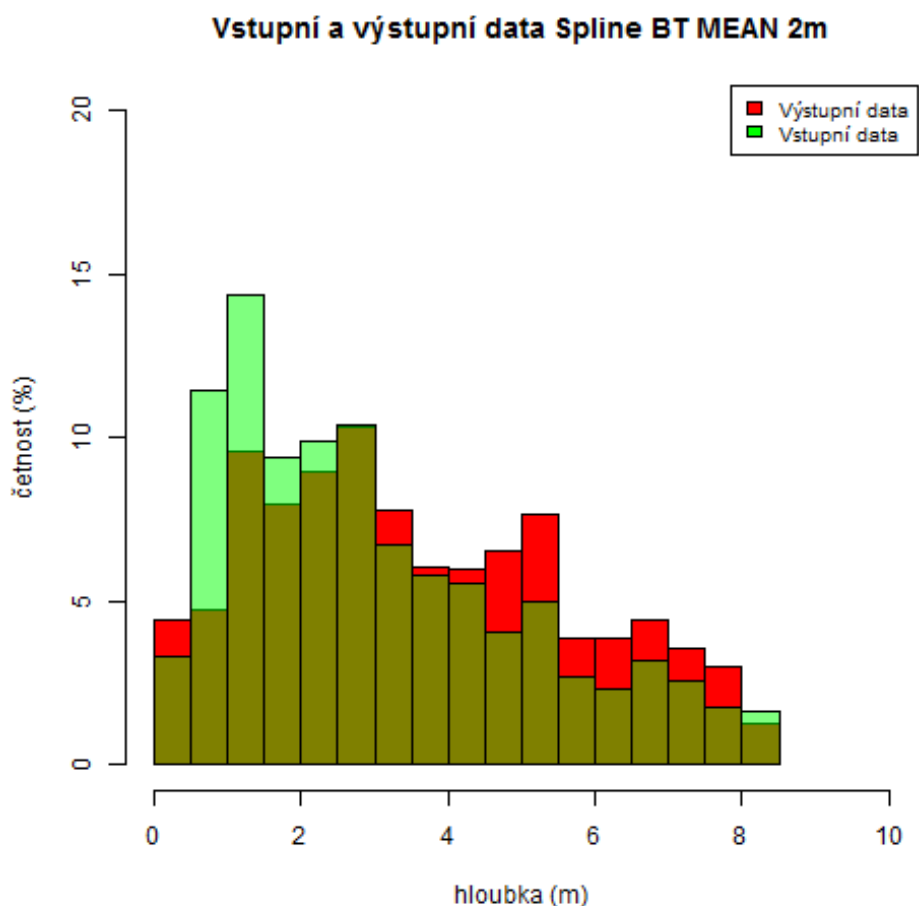


Obrázek 32: Výsledný rastr nejlepší interpolační metody Bottom-track Mean Spline with Tension

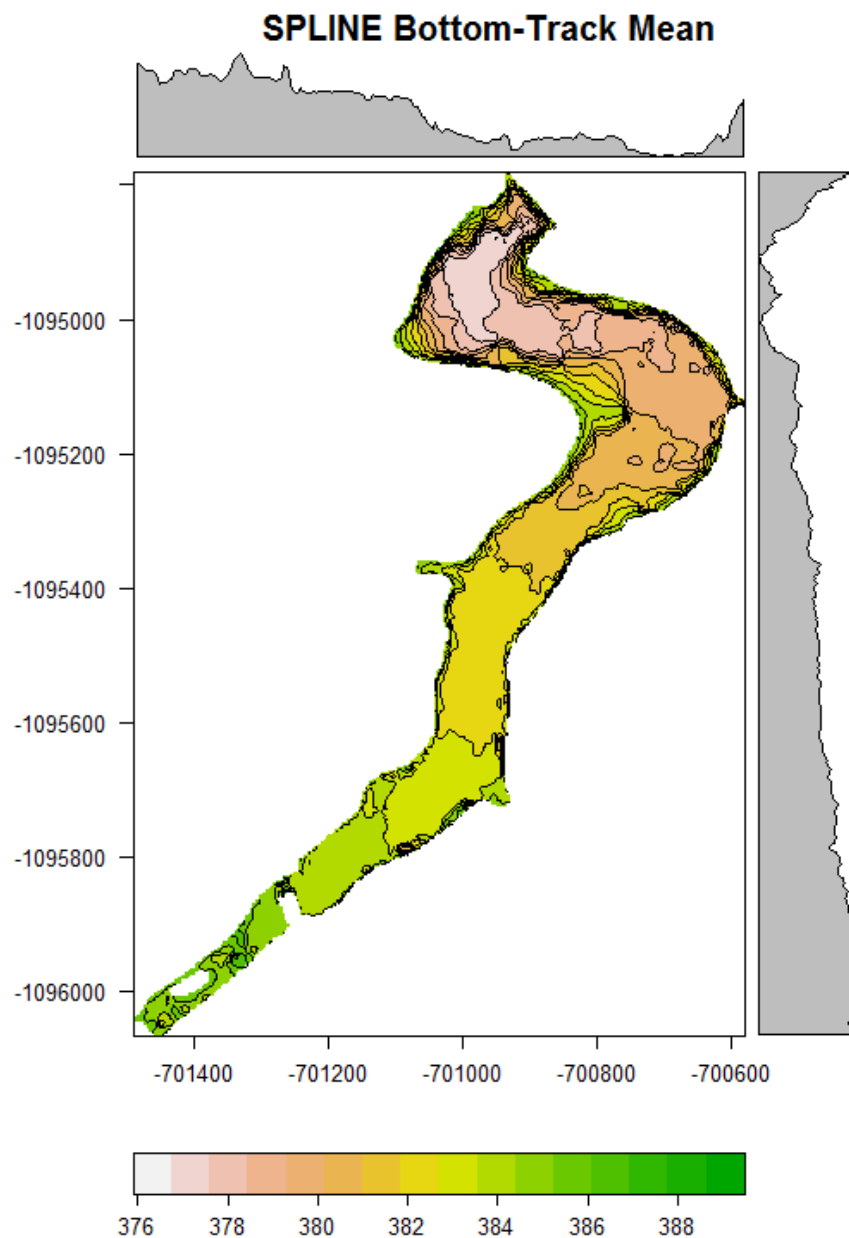
Průměrná hloubka nádrže výstupního rastru činí 3,859 m a maximální hloubka je 8,318 m (Tabulka 17). Oproti vstupním datům zde byl nárůst průměrné hloubky o 0,546 m a také nárůst maximální hloubky o 0,048 m. Porovnání měřených a interpolovaných dat je znázorněno v histogramu hloubek (Obrázek 33). Dále je zobrazena vrstevnicová mapa s vyznačenými průměrnými hloubkami v dané ose (Obrázek 34).

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M2 SPL BT MEAN 2	0,000144	1,898	3,209	3,589	5,152	8,318

Tabulka 17: Sumarizace interpolovaných dat



Obrázek 33: červená – data interpolovaná; zelená – data měřená



Obrázek 34: Nádrž s graficky vyznačenými průměrnými hodnotami na dané ose

Vytvořením vrstevnic z výsledného rastru a následným vložením do již existující mapy je kontrolováno, zda se vytvořené vrstevnice výrazně neliší od skutečnosti. Výsledné vrstevnice jsou zvoleny ve stejném rozpětí, jako je podkladová

Základní mapa ČR 1:10 000 a to ve vzdálenosti dva metry (Obrázek 35). Vzhledem k malé členitosti nádrže je návaznost na již známé vrstevnice nejvíce patrná v severní části nádrže, logicky v místě s nejvyšší hloubkou. Není patrná žádná výrazná odchylka od skutečného terénu.



Obrázek 35: Interpolované vrstevnice vložené do Základní mapy ČR 1:10 000

5.6. Analýza objemů a ploch

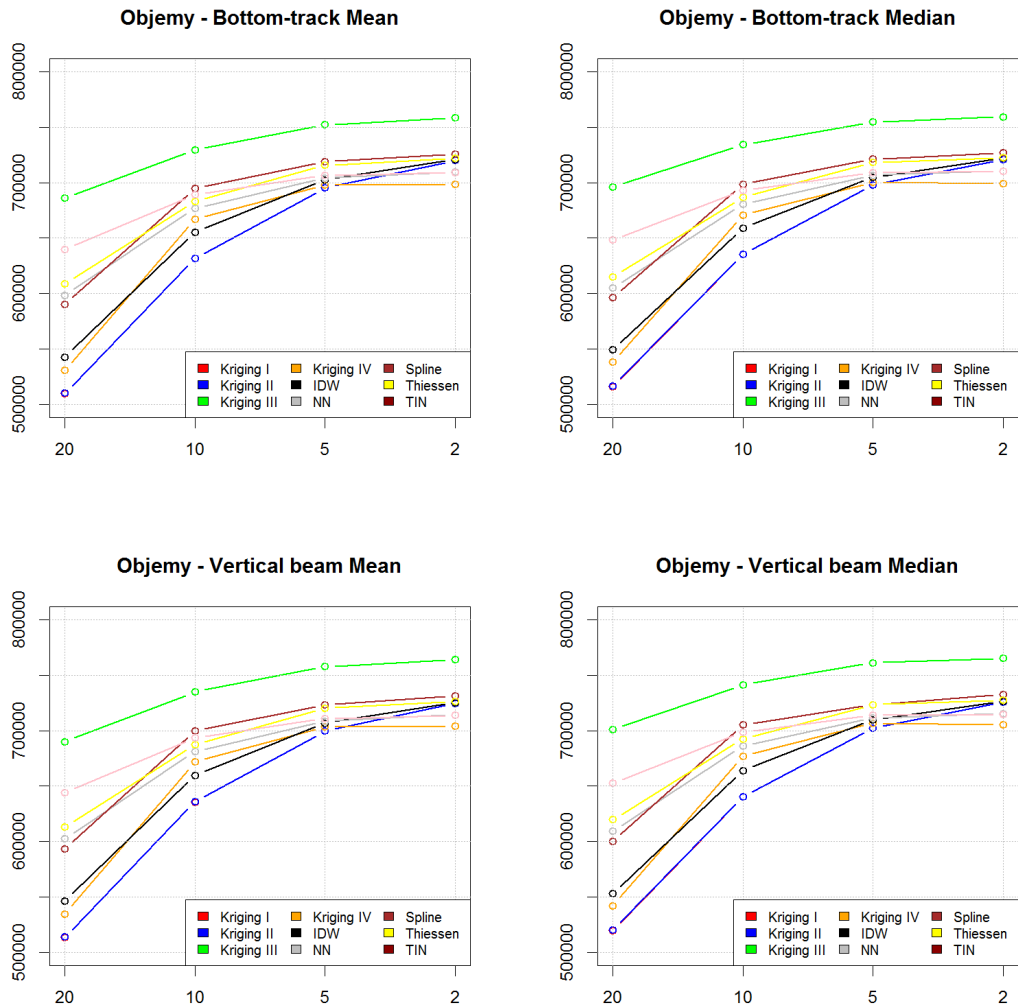
V této části je zhodnocen vliv rozlišení na změny objemů a ploch vodní nádrže Němčice. Byly vytvořeny objemové křivky interpolačních metod pro dané sady dat. Na základě nevhodnější metody Spline BT Mean 2 m byla vytvořena batymetrická křivka nádrže. Objemové křivky pro všechny sady dat a každou interpolační metodu jsou zobrazeny na Obrázek 36 pro první měření, které bylo na základě RMSE a MAE vyhodnoceno jako nejméně chybové. Ostatní měření jsou v příloze Obrázek 69 a Obrázek 70.

U všech metod spolu se zmenšením rozlišení docházelo k podhodnocování objemu nádrže. Z objemových křivek je dále patrné, že metoda UK používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu, která byla vyhodnocena jako průměrně nejlepší pro všechna měření, podává informaci o objemu s nejmenším rozptylem. Největší změna v objemech byla patrná při změně rozlišení z dvaceti na deset metrů a to zvětšení objemu v průměru o 120 000 m³. Naopak malé změny v objemu vykazovala nádrž pro přechod rozlišení z pěti na dva metry a to 1,6% z celkového objemu nádrže. Průměrný rozdíl mezi rozlišením dvacet a dva metry a to ze všech měření bylo 9,3% celkového objemu. Naopak největšího rozptylu mezi rastry dvacet a dva metry dosáhla metoda OK používající sférickou rovnici k popisu semivariogramu s rozptylem v průměru 207 627 m³.

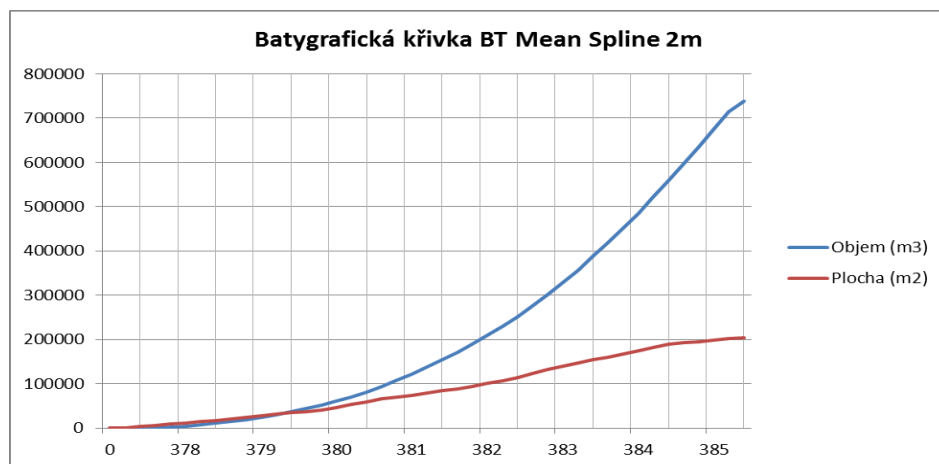
Za předpokladu, že nejpřesnější údaj o objemu podávalo rozlišení dva metry, pak byl průměrný objem 728 765 m³. Při každém měření byl odečten jiný aktuální stav hladiny. Největší rozdíl byl pozorován mezi měřeními prvním a druhým a to pokles hladiny o 5cm. Objem se zmenšil v průměru o 2 328 m³.

Se změnou objemů je spojena také změna zatopených ploch. Průměrná zatopená plocha během všech tří měření byla 20,1 ha. Během poklesu vodní hladiny o 5 cm mezi prvním a druhým měřeními byl rozdíl v zatopené ploše v průměru 0,5 ha. Zatopená plocha se vlivem zpřesnění rozlišení z 20 na 2 m zvětšila v průměru o 4 ha.

Obě hodnoty (průměr, zatopená plocha) znázorňuje batymetrická křivka (Obrázek 37). Pro názorný příklad je zobrazena batygrafická křivka pro metodu Spline BT Mean 2m. Obě hodnoty této křivky se pohybují okolo průměrných hodnot objemů a ploch.



Obrázek 36: Změny objemů nádrže jednotlivých metod pro různé sady dat v závislosti na rozlišení u prvního měření



Obrázek 37: Batygrafická křivka metody Spline BT Mean 2m

5.7. Vliv zanášení nádrže

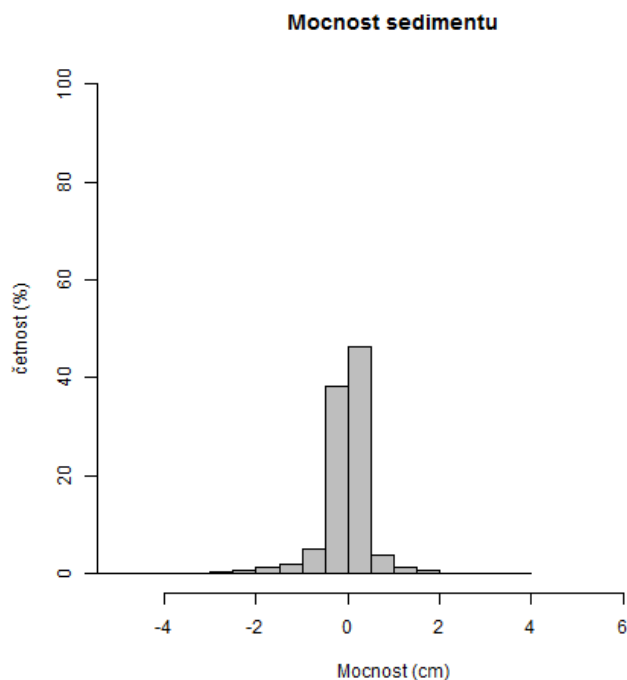
Tato část vyhodnocení je věnována zhodnocení režimu sedimentů na základě výsledků interpolací. Odečteno je třetí měření od prvního. Posouzena je mocnost sedimentů a jsou lokalizována kritická místa, na kterých je možný větší vliv usazování.

Odečtena byla metoda Spline VB Median 2 m ze třetího měření od metody Spline VB Median 2 m z měření prvního. Průměrná hodnota změny mocnosti sedimentů na celé nádrži se pohybovala okolo nulové hodnoty. V období mezi prvním a třetím měřením nedošlo k výrazné sedimentaci. Z hodnot 25% a 75% kvantilů je patrné, že změna objemu se pohybuje v hodnotách +/- 10 cm. Jednalo se o lokální nárůsty a přesuny usazených materiálů (Tabulka 18 a Obrázek 38).

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.	NA hod.
M2 SPL BT ME 2	-5,136	-0,1047	0,005295	-0,04019	0,0983	3,556	238673

Tabulka 18: Sumarizace rozložení sedimentů na celé nádrži

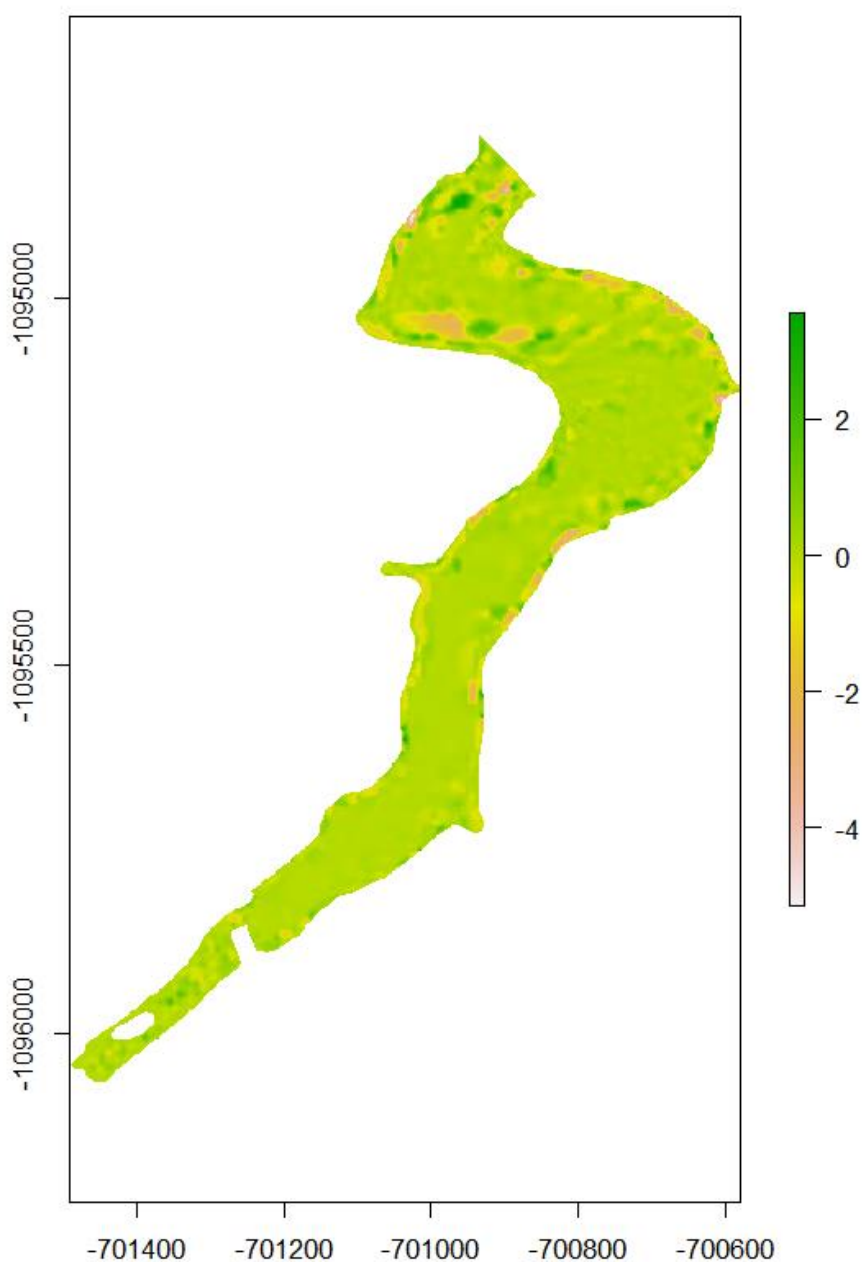
Vzhledem k určité chybě a odlišnosti rozmístění vstupních dat, není možné považovat extrémní hodnoty sumarizace za závazné, ale pouze jako určitý ukazatel kritických lokalit na nádrži, kde dochází k výraznějším změnám sedimentace.



Obrázek 38: Histogram rozložení sedimentů na celé nádrži

Lokality s výraznějším pohybem sedimentů se nacházely převážně v severnější části nádrže. Značné změny byly zaznamenány v okolí hráze a za ohybem nádrže v místě kde byl značný výskyt vegetace. Výraznější změny byly patrné podél břehů celé nádrže a na přítoku do nádrže. Na většině plochy nádrže se změna mocnosti sedimentů za dané období pohybuje okolo nuly (Obrázek 39).

Lokality ohrožené větším pohybem sedimentu



Obrázek 39: Lokality s výraznějšími změnami v sedimentaci v rozmezí 8 měsíců

6. Diskuze

Batymetrický průzkum malých vodních nádrží v České republice není v současné době příliš rozšířen. Díky velkému rozvoji moderních technologií a jejich dostupnosti široké veřejnosti je dnes tato metoda získávání dat velice rychlá a především poměrně jednoduchá. V rámci této práce byl realizován první batymetrický průzkum vodní nádrže v Němčicích. Užitím vypracovaných matematických postupů je dnes možné interpolovat nezměřené plochy, lze tak získat celistvý model povrchu sledovaného území.

Snímání dat probíhalo pomocí přístroje River Surveyor M9 umístěném na speciálně upraveném kajaku. Měřicí hlavice byla v lodi uložena tak, aby byl co nejméně eliminován vliv vodních vírů vzniklých pohybem po hladině. Díky tomu bylo dosaženo přesnějšího a rychlejšího měření, než by bylo realizováno se sériově dodávaným plovákem.

Základní částí interpolace jsou vstupní data. Měření byla najížděna bez předem stanovené trasy a tak nebyly získané body v pravidelném rozložení. Pravidelnost a hustota vstupních dat je pro odhad batymetrie velice důležitá. Rozdělením dat dle různých rozlišení jsem dosáhl určitého zlepšení pravidelnosti v získaných datech.

Hodnoceno bylo celkem devět interpolačních postupů pro odhad bodových batymetrických dat. Na základě výsledků práce bylo potvrzeno Burianovo (2008) tvrzení, že není určena žádná všestranná metoda, kterou můžeme interpolovat jakákoli vstupní data. Vždy je tedy nutné výsledné interpolační postupy ověřovat a navzájem mezi sebou porovnávat a to pro každé měření.

Z výsledků je dále patrné, že s podrobnějším rozlišením vstupních dat byla chybovost výstupních rastrů mnohem menší. Například při změně rozlišení z dvaceti na deset metrů se průměrná chyba zmenšila o 63%. Pro nerovnoměrné rozložení dat však u podrobných rozlišení vznikají větší plochy bez známých hodnot a na těchto místech byly sledovány určité nepřesnosti v interpolovaných datech. Pro ukázkou, ve druhém měření se vyskytla plocha bez měřených hodnot o velikosti 6200 m². Tuto chybu lze eliminovat podrobnějším a pravidelnějším najížděním nádrže, podobně jako to aplikoval Šiljeg (2015) na jezeře Vrana. Jednou z možností je naplánovat trasu předem pomocí GPS souřadnic.

Průměrně nejlépe hodnocenou metodou bez ohledu na rozlišení byla metoda UK. K podobnému výsledku dospěl také Kratzer a kol. (2006) během měření na řece Pine a na jezeře Huron. Další metodou, která dosáhla dobrých výsledků, byla metoda Spline. Rozdílnost těchto metod byla dobře viditelná na rozlišení dvacet metrů, kdy jeden bod představuje hodnotu pro 400 m². UK v tomto rozlišení vykazoval výrazně lepší odhad než Spline. Výsledné hodnoty u Spline byly ovlivněny tím, že interpolace procházela přesně naměřenými body a vlivem minimalizace zakřivení se pro větší vzdálenosti nedokáže interpolovaný povrch dostatečně přiblížit skutečnému terénu, jako je tomu u UK.

S podrobnějším rozlišením měření této práce však přesnost metody Spline rostla. Meng a kol. (2013) také poukázali na to, že deterministická metoda jako je Spline může podávat lepší výsledky než metody geostatistické (Kriging). Spline provádí minimalizaci zakřivení vstupních dat přidáním členů první derivace. Pro menší rozlišení se tento způsob predikce dat ukázal jako nejvhodnější. Minimalizace zakřivení vzhledem k pravidelnému tvaru nádrže, bez výraznějších terénních nerovností, dala přesný odhad neznámých hodnot.

Dalšími metodami, které podali poměrně přesné odhady hloubek, byla metoda Thiessenových polygonů a metoda TIN. Oboje metody také aplikovala Norton (2007), při měření sedimentů na rybníku Waldorf. Tyto metody vykazovaly podobné hodnoty, stejně tomu tak bylo i v této práci. Norton (2007) však vyšla jako méně chybná metoda TIN, výsledky diplomové práce poukazují na větší přesnost Thiessenových polygonů. Vzhledem ke své jednoduchosti metoda Thiessenových polygonů podala průměrný odhad o něco lepší než metoda TIN, která je založená právě na Thiessenových polygonech. Nepřesnost u TIN může vzniknout při tvorbě Delaunay trojúhelníků. Metoda je exaktní, při větších vzdálenostech mezi body může dojít k jisté nepřesnosti v odhadu.

S větším rozlišením docházelo k podhodnocení objemu nádrže. U metod s nejmenšími chybami RMSE a MAR byl rozdíl mezi rozlišeními výrazně menší než u ostatních interpolací. Pro rozlišení pět a méně metrů, již nedocházelo k výrazným změnám v objemu. Lze tak pětimetrové rozlišení považovat za určitou hranici při stanovení určitého odhadu objemů vodních nádrží měřených touto metodou. Stejně tak tomu bylo i při změně zatopené plochy nádrže. Větší rozlišení podhodnocují údaje o velikosti zatopené plochy.

Pro zhodnocení režimu sedimentů nádrže bylo posuzováno období mezi prvním a posledním měřením. Rozdíl činil pouze 8 měsíců, vzhledem k průběhu procesu sedimentace na MVN jde o poměrně krátkou dobu na zaznamenání výrazných změn. Z výstupů lze usoudit, že na většině plochy nádrže nedochází k výraznému usazování. Byla lokalizována jistá kritická místa s určitými změnami v sedimentaci, ale přesnou mocnost, na základě této práce, nelze s jistotou určit.

7. Závěr

Předložená diplomová práce měla za hlavní cíl vypracování vůbec prvního batymetrického průzkumu na vodní nádrži v Němčicích. Dále byla věnována zhodnocení kvality vstupních bodových batymetrických dat, poskytovaných měřicím přístrojem River Surveyor M9. Hodnocena byla významnost nastavení přístroje a poskytovaných dat, pro predikci neznámých hodnot. Věnována je také představení interpolačních metod, vytvořených v prostředí aplikace ArcGIS, kterými byla vstupní data zpracována. Kvalita vstupních dat je nejpodstatnější částí všech interpolačních postupů bez ohledu na měřenou veličinu. Kvalita dat se dá ovlivnit mnoha faktory, rozsah této práce nemůže zahrnout veškeré možné varianty a ověření správnosti postupů při sběru dat.

Pro vstup do interpolačních postupů byla data rozdělena do čtyř různých rozlišení. Rozbor získaných vstupních dat ukázal, že nádrž Němčice má pravidelný tvar i sklon dna, bez výrazných terénních nerovností. Z výsledků jednotlivých postupů je zřejmé, že neexistuje jedna univerzální interpolační metoda, která by vhodně interpolovala jakákoli bodová vstupní data.

Konkrétně pro nádrž Němčice, z celkového hlediska všech měření bez ohledu na rozlišení, vyšla nejlépe geostatistická metoda Universal Kriging používající kvadratickou rovnici pro popis semivariogramu. S menším rozlišením došlo dle předpokladu k zpřesnění interpolací. Menší rozlišení však mělo negativní vliv na velikost neznámých ploch. V těchto případech se ukázala jako přesnější deterministická metoda Spline s tenzí. Je to dáno především vlastnostmi postupu a také pravidelností nádrže. Potvrzen byl všeobecný předpoklad, že s pravidelností a hustotou dat roste přesnost interpolačních metod.

Vliv rozlišení na změnu objemu nádrže byl na výsledcích dobře viditelný. Spolu s horším rozlišením došlo k podhodnocování objemů nádrže. Největší rozdíl byl u přechodu z rozlišení dvacet na deset metrů. Naopak je patrné, že od rozlišení, které byla menší než pět metrů, nedochází ke změně v objemech větší než 2%. Je tedy tak stanovena určitá minimální hranice vzdálenosti jednotlivých transektů.

Z hodnocení režimu sedimentů na Němčické nádrži lze usoudit, že k sedimentaci, která by ovlivnila akumulací prostor nebo celkový chod nádrže, za sledované období, nedochází. Většina sedimentů byla usazena již na malé přednádrži na přítoku, která tak velice dobře plní svůj účel. Na mapovém výstupu rozložení sedimentů lze lokalizovat kritická místa, na kterých docházelo k jistým změnám. Jedná se o místa při břehu nádrže. Vzhledem k velkému výskytu vegetace v těsné blízkosti břehů, lze předpokládat, že velký podíl na změnách hloubky při břehu měl opad této vegetace.

Přístroj River Surveyor M9 spolu s upravenou měřicí lodí poskytli rychlé a především přesné změřením batymetrických dat. V rámci diplomové práce byl především vytvořen první digitální model dna vodní nádrže Němčice a také byl zhodnocen její aktuální stav a vliv okolních činitelů na její provoz. Získáno bylo několik zajímavých poznatků, které se dají do budoucna aplikovat na jiná měření malých vodních nádrží v podmínkách ČR.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

Angulo-Martinez M., Polez-Vicente M., Vicente-Serrano, Begueria S., 2009: Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain). *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 1907-1920.

Arun P. V., 2013: A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 16/2013: 133-139s.

Bello-Pineda J., Stefanoni-Hernández J. L., 2007: Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of Yucatan submerged platform. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*. 2/07: 247-254s.

Beran J., Vrána K., 1998: Rybníky a účelové nádrže. České vysoké učení technické v Praze. 150s.

Brassel K. E., Reif D., 1979: A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographical Analysis*, vol. 11, no, 3.: 289-303s.

Burian J., 2008: Vyznáte se v interpolacích? *GeoBusiness* 2008/11: 40-41s.

Burrough P. A., McDonnell R. A., 1998: Principles of Geographical Information Systems. Oxford University, Great Britain: 352s.

Cressie N. A. C., 1993: *Statistic for spatial data* revised edition. A Wiley-Interscience publication. ISBN: 978-0-471-00255-0: 928s.

Curtarelli M., Leão J., Ogashawara I., Lorenzetti J., Stech J., 2015: Assessment of Spatial Interpolation Methods to Map the Bathymetry of an Amazonian Hydroelectric Reservoir to Aid in Decision Making for Water Management. Remote Sensing Division, National Institute for Space Research, São José dos Campos, São Paulo, Brazil: 16s.

Ecological Society of American Meeting, 2015: Going On The Grid – Gridding & Spatial Interpolation, Baltimore, 13 srpen.

Ernstsen V., Noormets R., Hebbeln D., Bartholomé A., Flemming B., 2006: Precision of high-resolution multibeam echo sounding coupled with highaccuracy positioning in a shallow water coastal environment, *Geo-Mar. Lett.*, 141–149s.

Finkl C. W., Benedet L., Andrews, J. L., 2004: Laser airborne depth sounder (lads): a new bathymetric survey technique in the service of coastal engineering, environmental studies, and coastal zone management, in: *Proceedings of the 17th annual national conference on beach preservation technology*, Tallahassee, Florida, 11–26s.

Goovaerts P., 1997: *Geostatistic for Natural Resources Evaluation*, Oxford University, Great Britain: 483 s.

Daňhelka J., Boháč M., Crhová L., Čekal R., Černá L., Fiala R., Chuchma F., Kohut M., Kourková H., Kubát J., Kukla P., Kulhavá R., Možný M., Reitschläger J.D., Sandev M., Šřivánková P., Šercl P., Štěpánek M., Valeriánová A., Vlnas R., Vrabec M., Vráblík M., Zahradníček P., Zrzavecký M., 2015: Vyhodnocení sucha na území České republiky v roce 2015. Český hydrometeorologický ústav, Ministerstvo životního prostředí: 73s.

Dolanksý T., 2004: Lidary a letecké laserové skenování, Acta Universitatis Purkynianae 99, Studia Geoinformatica. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem. ISBN: 80-7044-575-0: 100s.

Chai T. a Draxler R. R., 2014: Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Methods for assessment of models. Geoscientific Model Development, 7: 1247-1250s.

Ježek J., 2015: Geostatistika a prostorová interpolace. Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-3076-2: 197s.

Johnston K., Ver-Hoef J. M., Krivoruchko K., Lucas N., 2001: Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI, USA: 300 s.

Kadlčíková J., 2007: Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu. Geomorphologia Slovaca et Bohemica. 2/2007: 14-18s.

Karl J. W. a Maurer B. A., 2010: Spatial dependency of predictions from image segmentation: a variogram-based method to determine appropriate scales for producing land-management information. Ecological Information 5: 194-202s.

Kohavi R., 2001: A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. Computer Science Department. Stanford University: 7s.

Kovář P., 2014: Hydrologická „střecha Evropy“ s kanálem Dunaj-Odra-Labe? Časopis Živá 6/2014: 133-136

Kratzer, J. F., Hayes D. B., Thompson B. E., 2006: Methods for interpolating stream width, depth, and current velocity. Ecological modelling, 196: 256–264s.

Kubík L., Monitoring rybníčních a říčních sedimentů, průběžná zpráva 1995 – 2010. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně: 24s.

L3 ELAC Nautic, 2010: Hydrographic Echosounder Hydrostar 4300. Technical Manual, L-3 Communications ELAC Nautik GmbH: 58s.

Li J., Heap A. D., 2008: A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Geoscience Australia: Canberra, Australia: 154s.

Li J. Heap A.D., 2011: A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Ecological Informatics 6: 228-241s.

Meng Q., Liu Z., Borders B.E., 2013: Assessment of regression kriging for Spatial interpolation - Comparisons of seven GIS interpolation methods. Cartography and Geographic Information Science, 40/1: 28–39s.

Merwade V. M., Maidment D. R., Goff J. A., 2006: Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. Journal of Hydrology 331: 731-741s.

Milerski R., 2004: Vodohospodářské stavby, Modul 04, Meliorační stavby. Vysoké učení technické v Brně: 60s.

Ministerstvo zemědělství, 2001: Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 470/2001, § 4

Ministerstvo životního prostředí, 2015: Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR – Vodní režim v krajině a vodní hospodářství. Ministerstvo životního prostředí v meziresortní spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavem. 11/2015: 36-43s.

Mitasova H., Mitas L, 1988: General Variational Approach to the Interpolation Problem. Computer and Mathematics with Applications. Vol. 16. No. 12.: 988–989s.

Naoum S., Tsanis I. K., 2004: Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based DSS, Global Nest J.: 20s.

Norton K., 2007: Spatial interpolation of patterns of sediment deposition in two urban stormwater detention ponds. Environmental Science and Resources. Portland State University: 22s.

Peng X., Wang K., Li Q., 2014: A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy, Annals of Nuclear Energy 68: 118–123s.

Peralvo M., 2012: Influence of DEM interpolation methods in Drainage Analysis, University of Texas 2012. 26s.

Pokhrel R. M., Kuwano J., Tachibana S., 2012: A kriging method of interpolation used to map liquefaction potential over alluvial ground, Engineering Geology 152: 26–37.

Pokorná M., 2007: Za hranice Batymetrie. ČVUT, Fakulta stavební: katedra vyšší geodézie: 10s.

Povodí Vltavy s. p., 2010: VD Němčice. <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/nemcice.pdf>

Povodí Vltavy s. p., 2013: VD Němčice. <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vymerovaci-lode>

Pribičević B., Medak D. a Kordič B., 2007: Primjena dvofrekventne batimetrije u određivanju sedrenih naslaga, Geod. List, 1:18s.

Punčochář P., 2007: Změna klimatu a vodní zdroje ČR. Časopis Stavebnictví, č.:03/07. http://www.casopisstavebnictvi.cz/zmena-klimatu-a-vodni-zdroje-cr_N133

Rožnovský J., 2012: Sucho na území ČR a jeho dopady. Český hydrometeorologický ústav, Ministerstvo životního prostředí: 60s.

Rožnovský J., 2014: Projevy změny klimatu v regionech Česka – jaké dopady očekáváme a co již pozorujeme. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Ministerstvo životního prostředí: 61s.

Sibson R., 1981: „A Brief Description of Natural Neighbor Interception“, Chapter 2 in Interpolating multivariable data, John Wiley & Sons, New York: 21-36s.

SonTec, 2011: RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 1.5. A Division of YSI Inc.: 141s.

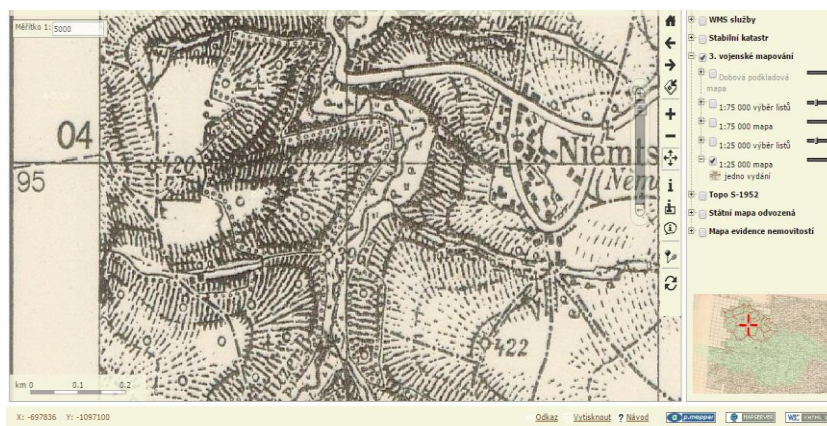
Šiljeg A., Lozić S. and Šiljeg S., 2015: A comparison of interpolation methods on the basis of data obtained from a bathymetric survey of Lake Vrana, Croatia. University of Zadar, Geography Department. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 3653-3666: 14s.

Štoll I, 1993: Život a dílo badatele Dopplera. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, JČMF: 260-269s.

Townsend N., 2004: New Technologies and Airborne LiDAR Bathymetry survey Techniques in European Environmental, Coastal Mapping Projects. Fugro LADS Corporation: 41s.

Watson D. F., Philip G. M., 1985: A refinement of inverse distance weighted interpolation, Geo.Processing: 315-327

9. Přílohy



Obrázek 40: III. vojenské mapování – Česká republika (1877-1880)
(zdroj: <http://archivnimapy.cuzk.cz/>)



Obrázek 41: Měřicí loď Valentýna II (zdroj: <http://technet.idnes.cz/vymerovaci-lod-valentyna-0y1-/>)



Obrázek 42: Měřicí člun Joska (zdroj: www.pvl.cz)



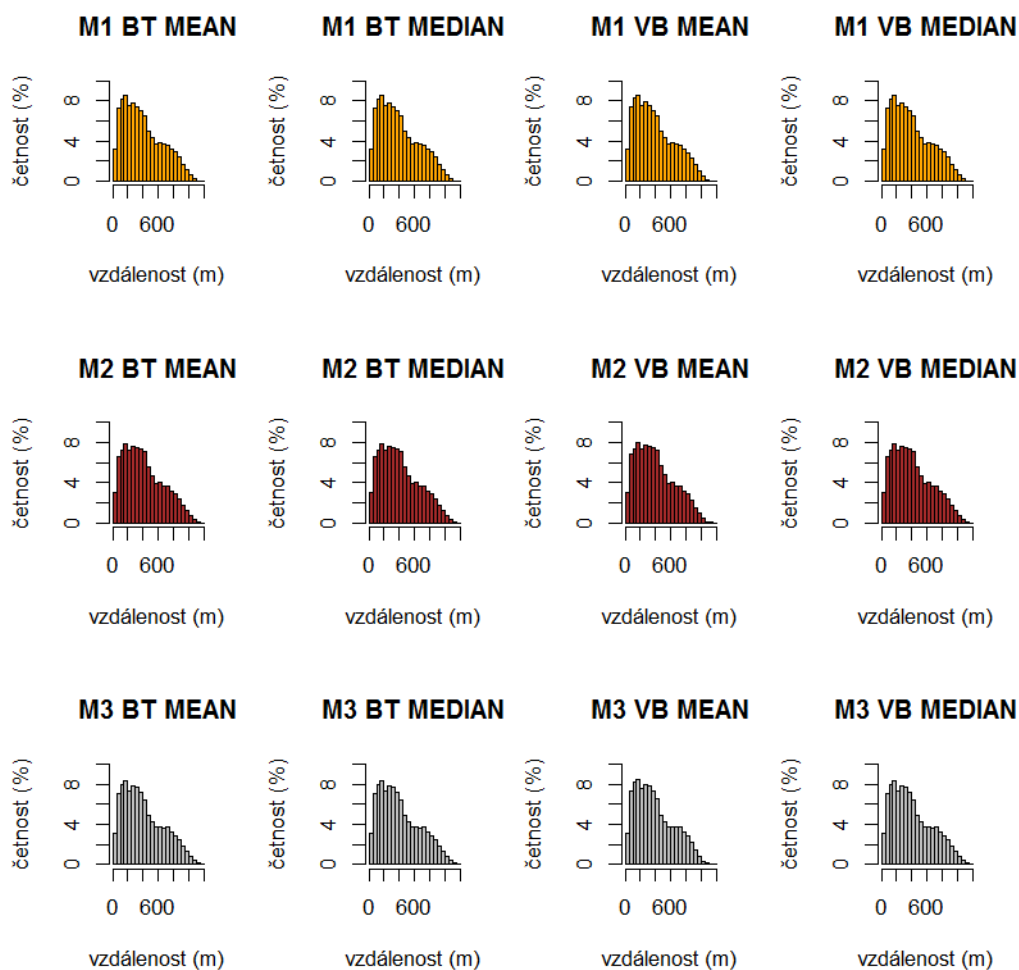
Obrázek 43: Základní stanice RTK (foto: Jan Prchal)



Obrázek 44: Měřicí loď (foto: Jan Prchal)

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 20	20	184.4	349.9	398	580.3	1176
M1 BT MEDIAN 20	20	184.4	349.9	398	580.3	1176
M1 VB MEAN 20	20	184.4	349.3	394.8	572.7	1176
M1 VB MEDIAN 20	20	184.4	349.9	398	580.3	1176
M2 BT MEAN 20	20	201	368.8	409.6	584.1	1183
M2 BT MEDIAN 20	20	201	368.8	409.6	584.1	1183
M2 VB MEAN 20	20	201	368.8	409.6	584.1	1183
M2 VB MEDIAN 20	20	201	368.8	409.6	584.1	1183
M3 BT MEAN 20	20	189.7	356.1	405	588.2	1196
M3 BT MEDIAN 20	20	189.7	356.1	405	588.2	1196
M3 VB MEAN 20	20	189.7	356.1	405	588.2	1196
M3 VB MEDIAN 20	20	189.7	356.1	405	588.2	1196

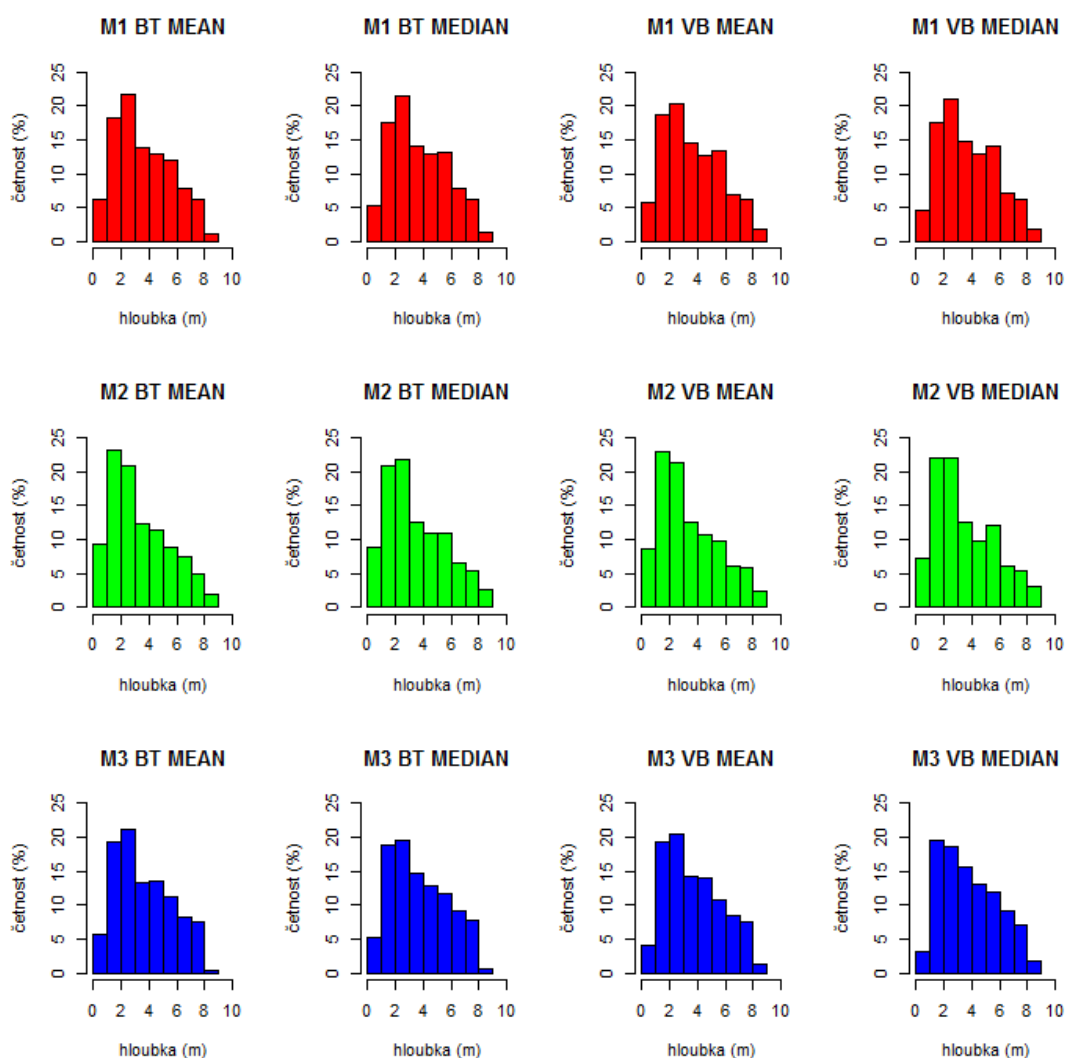
Tabulka 19: Sumarizace vzdáleností vstupních dat pro rozlišení 20m



Obrázek 45: Histogramy vzdáleností vstupních bodů pro 20m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 20	0.20	2.07	3.27	3.648	5.162	8.15
M1 BT MEDIAN 20	0.22	2.16	3.45	3.732	5.28	8.24
M1 VB MEAN 20	0.02	2.07	3.33	3.685	5.265	8.232
M1 VB MEDIAN 20	0.49	2.20	3.54	3.78	5.33	8.28
M2 BT MEAN 20	0.03	1.62	2.82	3.33	4.866	8.148
M2 BT MEDIAN 20	0.22	1.77	2.92	3.433	5	8.19
M2 VB MEAN 20	0.02	1.69	2.868	3.386	4.908	8.279
M2 VB MEDIAN 20	0.49	1.79	2.98	3.503	5.06	8.31
M3 BT MEAN 20	0.06	2.04	3.242	3.658	5.17	8.054
M3 BT MEDIAN 20	0.22	2.08	3.44	3.732	5.347	8.1
M3 VB MEAN 20	0.03	2.13	3.38	3.743	5.26	8.188
M3 VB MEDIAN 20	0.43	2.22	3.54	3.827	5.385	8.22

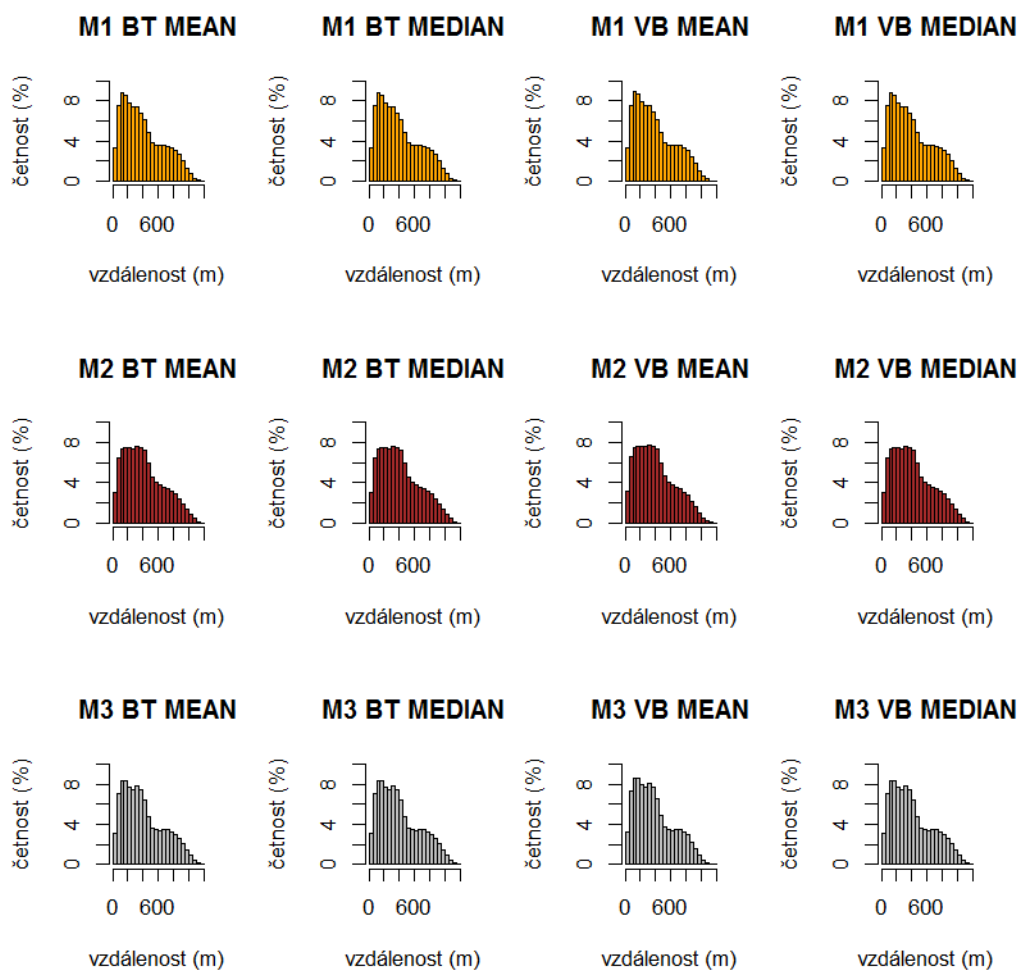
Tabulka 20: Sumarizace hloubek vstupních dat pro rozlišení 20m



Obrázek 46: Hitogramy hloubek pro 20m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 10	10	181.1	346.6	399.4	588.3	1193
M1 BT MEDIAN 10	10	181.1	346.6	399.4	588.3	1193
M1 VB MEAN 10	10	180.3	340.1	391.3	572.8	1193
M1 VB MEDIAN 10	10	181.1	346.6	399.4	588.3	1193
M2 BT MEAN 10	10	205.2	371.2	410.9	583.1	1195
M2 BT MEDIAN 10	10	205.2	371.2	410.9	583.1	1195
M2 VB MEAN 10	10	205.2	371.2	410.9	583.1	1195
M2 VB MEDIAN 10	10	205.2	371.2	410.9	583.1	1195
M3 BT MEAN 10	10	189.7	351.1	404.2	588.3	1196
M3 BT MEDIAN 10	10	189.7	351.1	404.2	588.3	1196
M3 VB MEAN 10	10	189.7	351.1	404.2	588.3	1196
M3 VB MEDIAN 10	10	189.7	351.1	404.2	588.3	1196

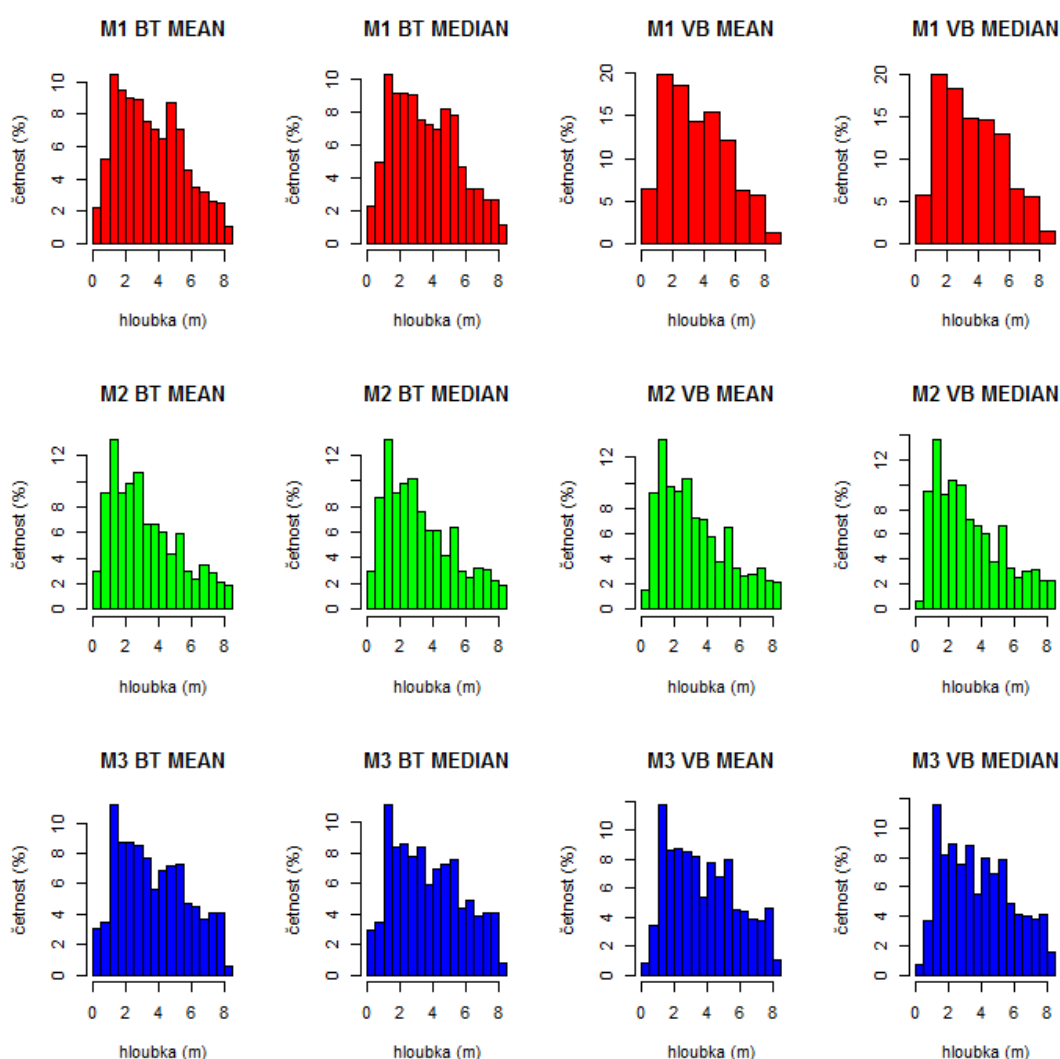
Tabulka 21: Sumarizace vzdáleností vstupních dat pro rozlišení 10m



Obrázek 47: Histogramy vzdáleností vstupních bodů pro 10m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 10	0.14	1.89	3.27	3.542	4.989	8.217
M1 BT MEDIAN 10	0.22	1.93	3.34	3.574	5.02	8.24
M1 VB MEAN 10	0.07853	1.929	3.331	3.602	5.02	8.262
M1 VB MEDIAN 10	0.44	1.96	3.4	3.644	5.07	8.3
M2 BT MEAN 10	0.03667	1.482	2.758	3.213	4.62	8.23
M2 BT MEDIAN 10	0.22	1.51	2.78	3.25	4.705	8.26
M2 VB MEAN 10	0.05857	1.53	2.78	3.281	4.708	8.38
M2 VB MEDIAN 10	0.41	1.6	2.83	3.325	4.76	8.38
M3 BT MEAN 10	0.01167	1.918	3.372	3.699	5.304	8.092
M3 BT MEDIAN 10	0.21	1.968	3.455	3.731	5.32	8.1
M3 VB MEAN 10	0.05471	2.039	3.506	3.803	5.347	8.234
M3 VB MEDIAN 10	0.39	2.07	3.54	3.835	5.378	8.25

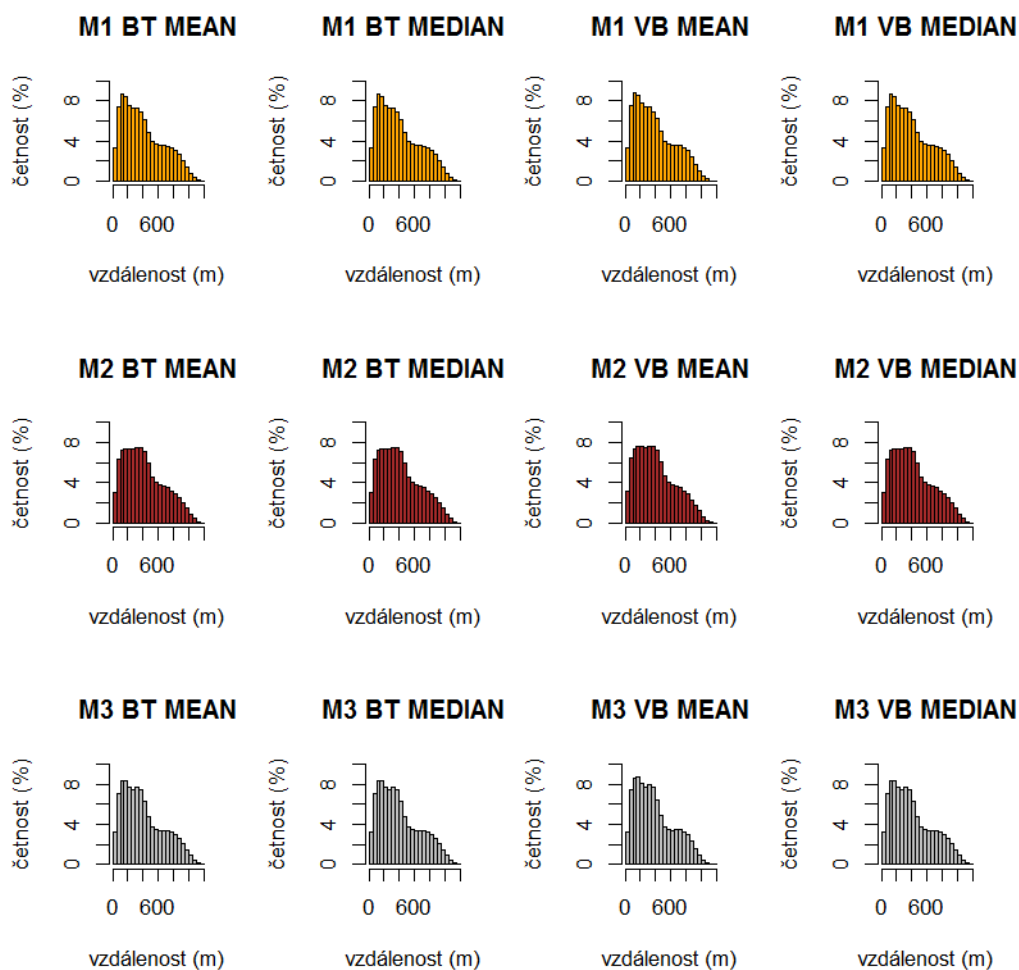
Tabulka 22: Sumarizace hloubek vstupních dat pro rozlišení 10m



Obrázek 48: Hitogramy hloubek pro 10m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 5	5	183.1	350	402.3	592.3	1188
M1 BT MEDIAN 5	5	183.1	350	402.3	592.3	1188
M1 VB MEAN 5	5	180.1	343	392.4	574.7	1188
M1 VB MEDIAN 5	5	183.1	350	402.3	592.3	1188
M2 BT MEAN 5	5	206.2	375	415.4	593	1191
M2 BT MEDIAN 5	5	206.2	375	415.4	593	1191
M2 VB MEAN 5	5	206.2	375	415.4	593	1191
M2 VB MEDIAN 5	5	206.2	375	415.4	593	1191
M3 BT MEAN 5	5	187.2	348.6	402.9	587.4	1199
M3 BT MEDIAN 5	5	187.2	348.6	402.9	587.4	1199
M3 VB MEAN 5	5	187.2	348.6	402.9	587.4	1199
M3 VB MEDIAN 5	5	187.2	348.6	402.9	587.4	1199

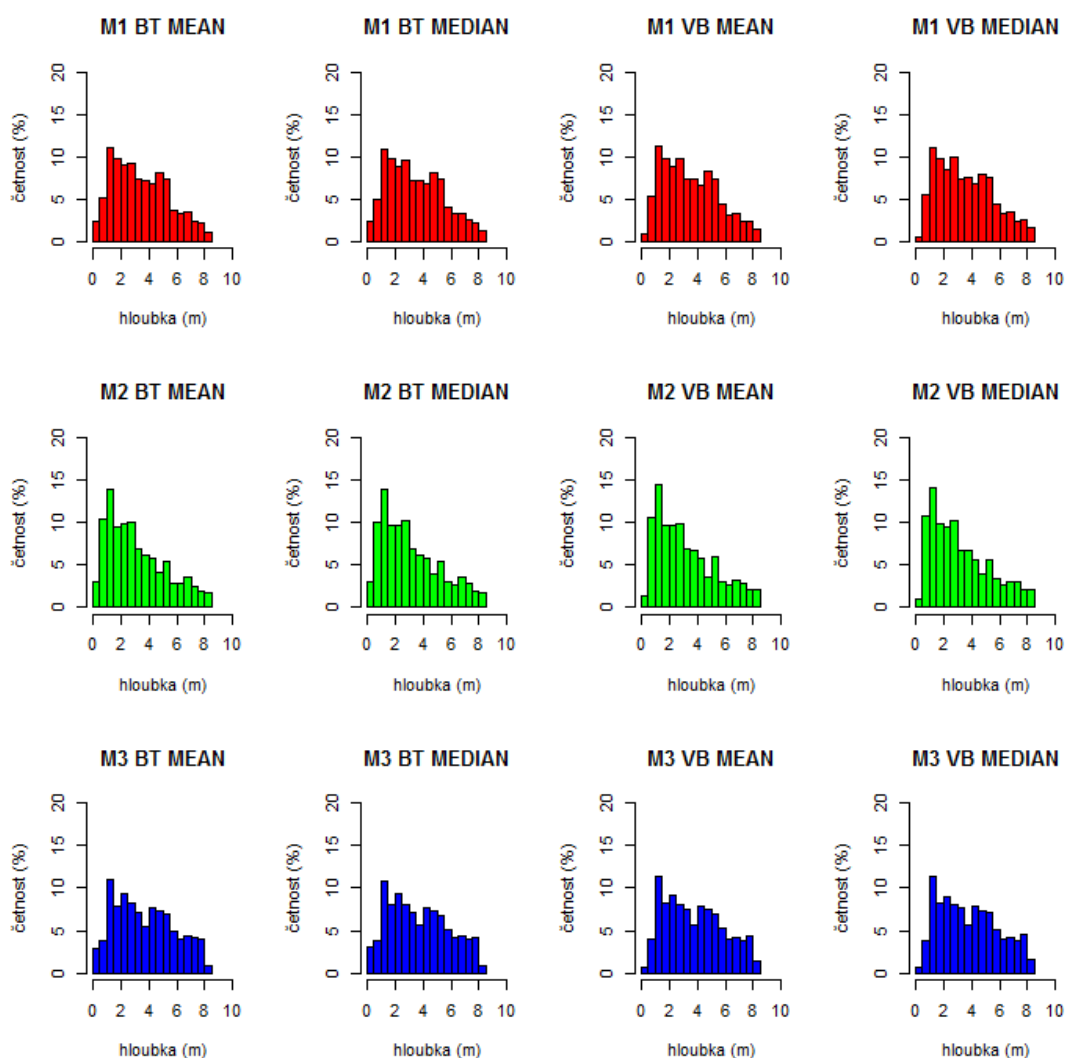
Tabulka 23: Sumarizace vzdáleností vstupních dat pro rozlišení 5m



Obrázek 49: Histogramy vzdáleností vstupních bodů pro 5m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 5	0.14	1.827	3.202	3.481	4.925	8.28
M1 BT MEDIAN 5	0.22	1.85	3.22	3.498	4.95	8.28
M1 VB MEAN 5	0.03156	1.905	3.275	3.55	4.975	8.32
M1 VB MEDIAN 5	0.41	1.92	3.29	3.571	4.99	8.32
M2 BT MEAN 5	0.03667	1.418	2.655	3.137	4.472	8.273
M2 BT MEDIAN 5	0.22	1.43	2.67	3.156	4.49	8.26
M2 VB MEAN 5	0.1367	1.455	2.707	3.205	4.55	8.403
M2 VB MEDIAN 5	0.41	1.47	2.72	3.226	4.588	8.4
M3 BT MEAN 5	0.01312	1.95	3.48	3.728	5.337	8.157
M3 BT MEDIAN 5	0.21	1.97	3.5	3.745	5.37	8.2
M3 VB MEAN 5	0.093	2.08	3.57	3.833	5.395	8.302
M3 VB MEDIAN 5	0.39	2.1	3.59	3.852	5.415	8.34

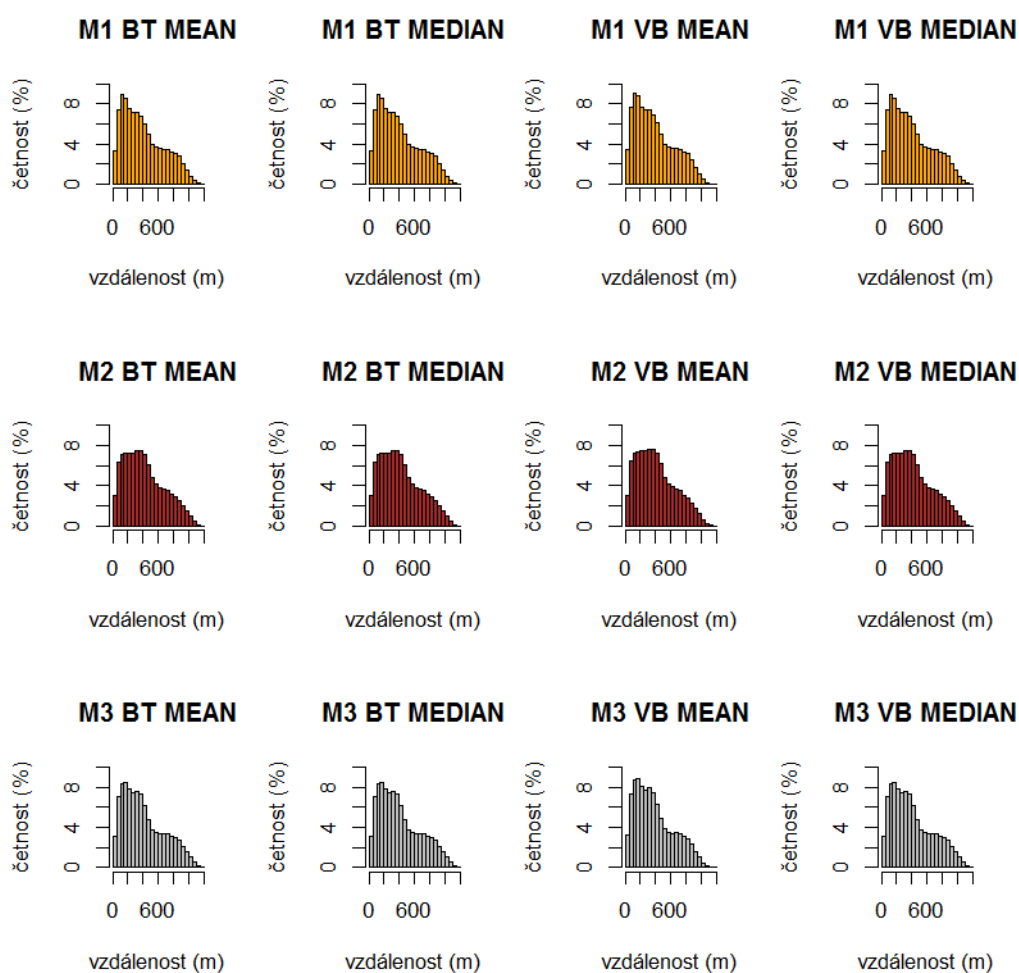
Tabulka 24: Sumarizace hloubek vstupních dat pro rozlišení 5m



Obrázek 50: Hitogramy hloubek pro 5m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M1 BT MEDIAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M1 VB MEAN 2	2	176.9	339.7	389.4	569.9	1188
M1 VB MEDIAN 2	2	180.3	348.1	401.1	590.5	1190
M2 BT MEAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 BT MEDIAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 VB MEAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M2 VB MEDIAN 2	2	208.8	378.4	417.7	594.8	1190
M3 BT MEAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 BT MEDIAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 VB MEAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198
M3 VB MEDIAN 2	2	187.4	349.7	405.4	591.5	1198

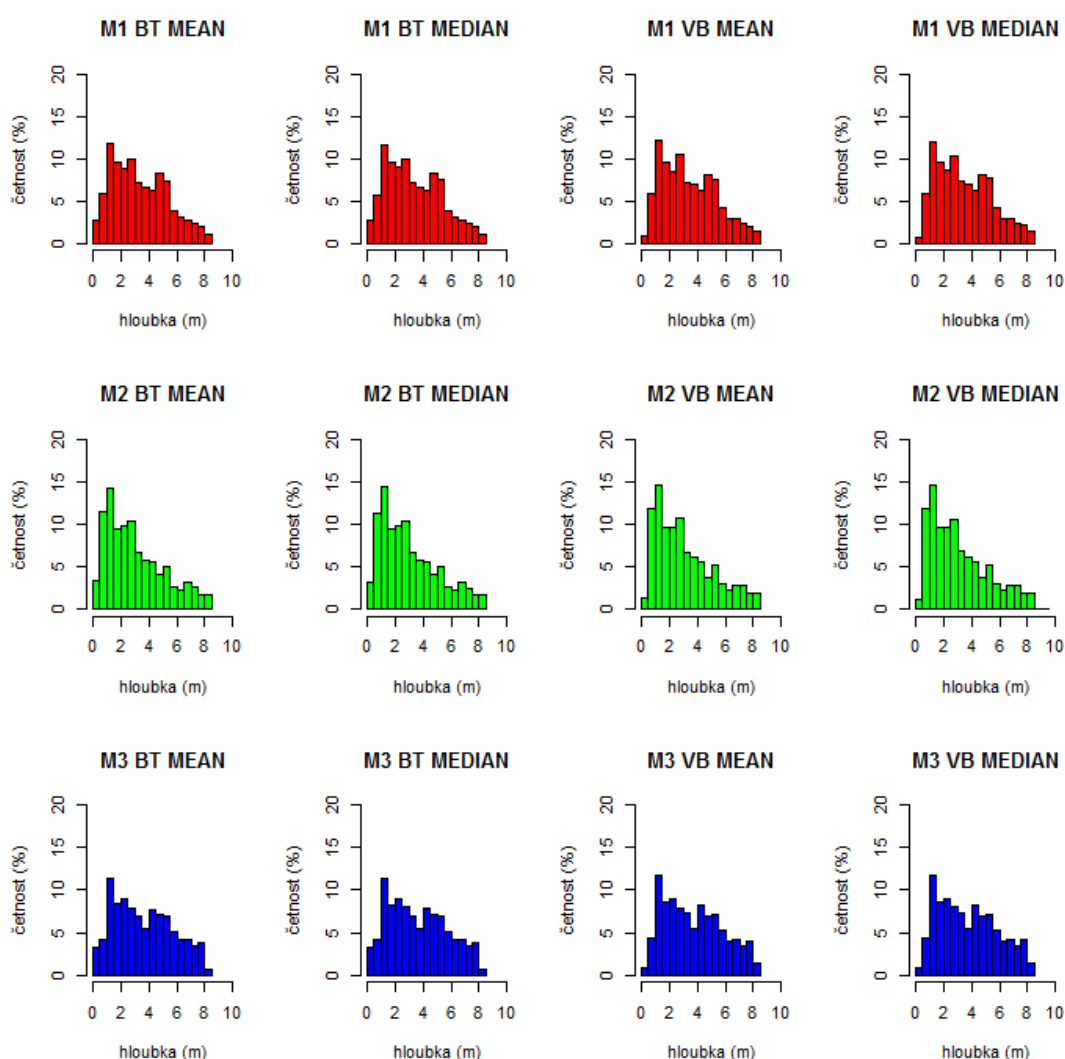
Tabulka 25: Sumarizace vzdáleností vstupních dat pro rozlišení 2m



Obrázek 51: Histogramy vzdáleností vstupních bodů pro 2m rozlišení

	Min.	X1st.Qu.	Median	Mean	X3rd.Qu.	Max.
M1 BT MEAN 2	0.11	1.74	3.06	3.401	4.86	8.28
M1 BT MEDIAN 2	0.22	1.75	3.07	3.408	4.87	8.28
M1 VB MEAN 2	0.01393	1.82	3.14	3.48	4.91	8.35
M1 VB MEDIAN 2	0.39	1.83	3.15	3.488	4.915	8.35
M2 BT MEAN 2	0.07333	1.33	2.56	3.043	4.28	8.27
M2 BT MEDIAN 2	0.21	1.34	2.57	3.05	4.29	8.27
M2 VB MEAN 2	0.1864	1.39	2.63	3.115	4.36	8.4
M2 VB MEDIAN 2	0.39	1.4	2.64	3.123	4.37	9.4
M3 BT MEAN 2	0.035	1.864	3.385	3.66	5.28	8.22
M3 BT MEDIAN 2	0.21	1.89	3.4	3.667	5.28	8.22
M3 VB MEAN 2	0.0173	1.97	3.53	3.77	5.35	8.34
M3 VB MEDIAN 2	0.39	1.98	3.53	3.778	5.36	8.34

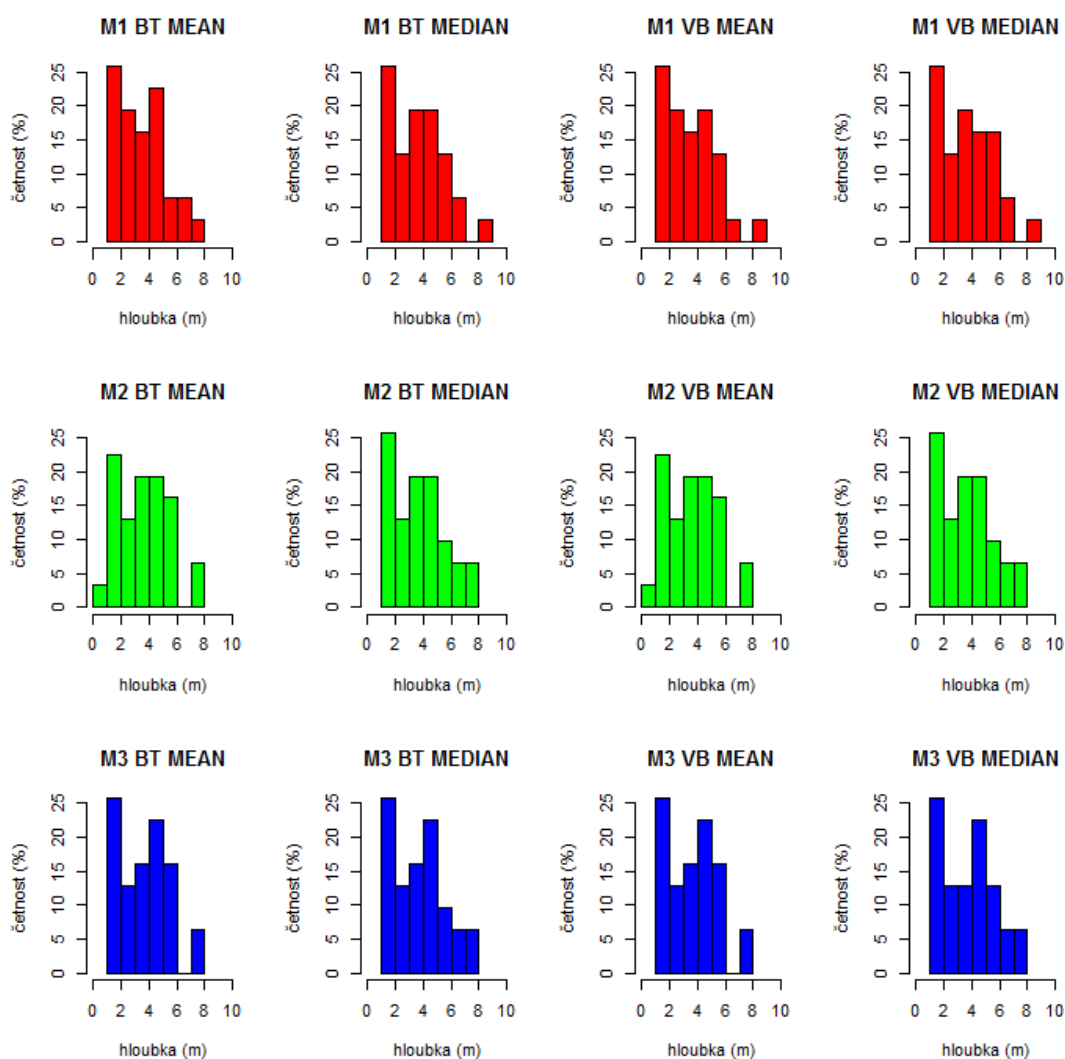
Tabulka 26: Sumarizace hloubek vstupních dat pro rozlišení 2m



Obrázek 52: Hitogramy hloubekt pro 2m rozlišení

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 20	1.003	2.037	3.267	3.448	4.525	7.975
M1 BT MEDIAN 20	1.01	2.035	3.73	3.588	4.87	8.06
M1 VB MEAN 20	1.001	2.044	3.298	3.462	4.542	8.125
M1 VB MEDIAN 20	1.02	2.05	3.78	3.603	4.915	8.17
M2 BT MEAN 20	0.9867	2.067	3.66	3.519	4.768	7.469
M2 BT MEDIAN 20	1.02	2.075	3.83	3.62	4.89	7.46
M2 VB MEAN 20	0.9853	2.076	3.674	3.538	4.813	7.578
M2 VB MEDIAN 20	1.02	2.08	3.84	3.639	4.96	7.56
M3 BT MEAN 20	1.017	2.097	3.69	3.549	4.798	7.499
M3 BT MEDIAN 20	1.05	2.105	3.86	3.65	4.92	7.49
M3 VB MEAN 20	1.015	2.106	3.704	3.568	4.843	7.608
M3 VB MEDIAN 20	1.05	2.11	3.87	3.669	4.99	7.59

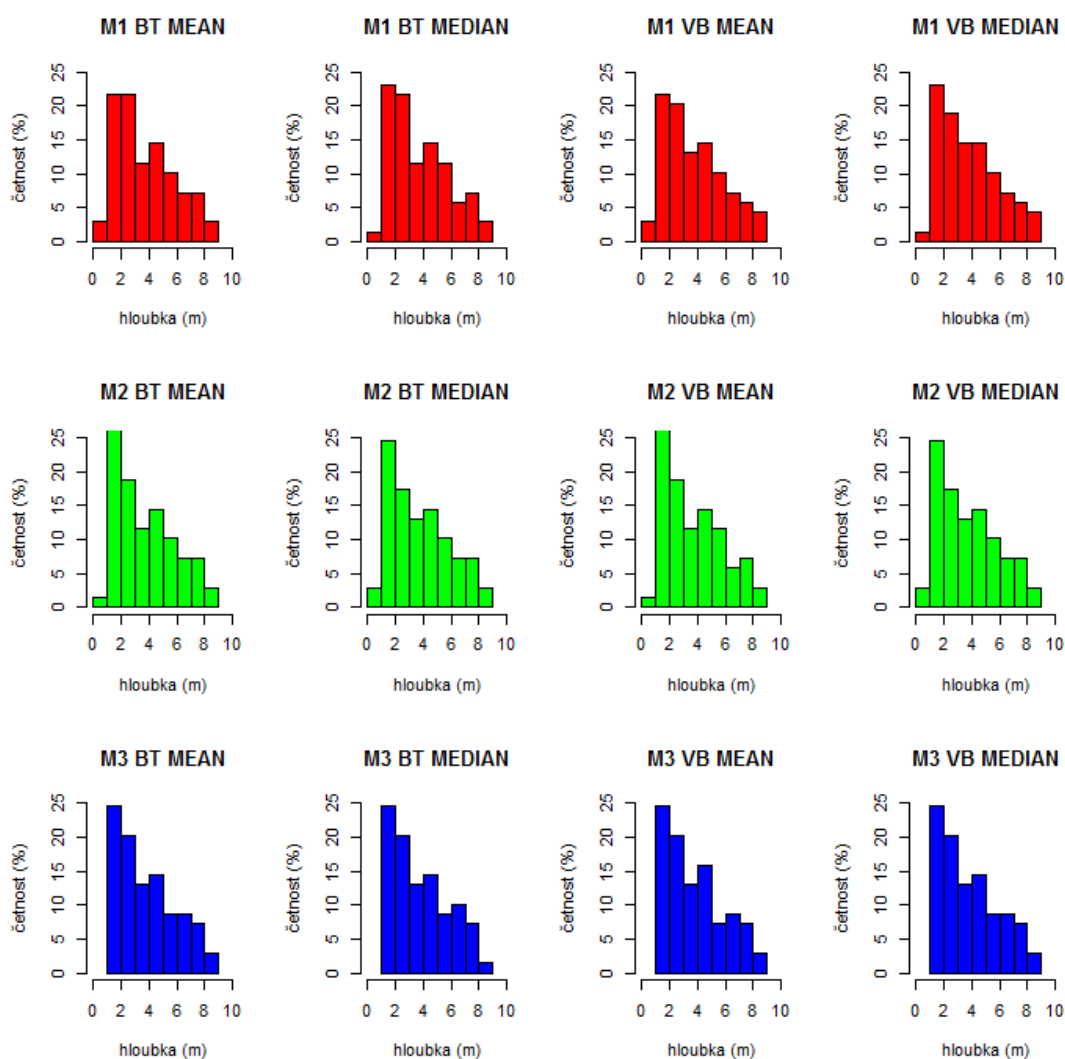
Tabulka 27: Sumarizace kontrolních dat pro rozlišení 20 m.



Obrázek 53: Histogramy kontrolních dat pro rozlišení 20m

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 10	0.9744	2.173	3.278	3.763	5.14	8.252
M1 BT MEDIAN 10	0.99	2.18	3.26	3.776	5.19	8.26
M1 VB MEAN 10	0.9656	2.19	3.3	3.793	5.157	8.267
M1 VB MEDIAN 10	0.99	2.2	3.29	3.804	5.16	8.29
M2 BT MEAN 10	0.8057	1.928	3.253	3.747	5.224	8.135
M2 BT MEDIAN 10	0.82	1.93	3.27	3.757	5.25	8.14
M2 VB MEAN 10	0.7907	1.896	3.293	3.772	5.182	8.262
M2 VB MEDIAN 10	0.81	1.91	3.3	3.791	5.24	8.26
M3 BT MEAN 10	1.013	2.148	3.3	3.761	5.305	8.05
M3 BT MEDIAN 10	1.01	2.16	3.3	3.781	5.32	8.05
M3 VB MEAN 10	1.015	2.18	3.34	3.804	5.345	8.12
M3 VB MEDIAN 10	1.02	2.19	3.34	3.813	5.36	8.11

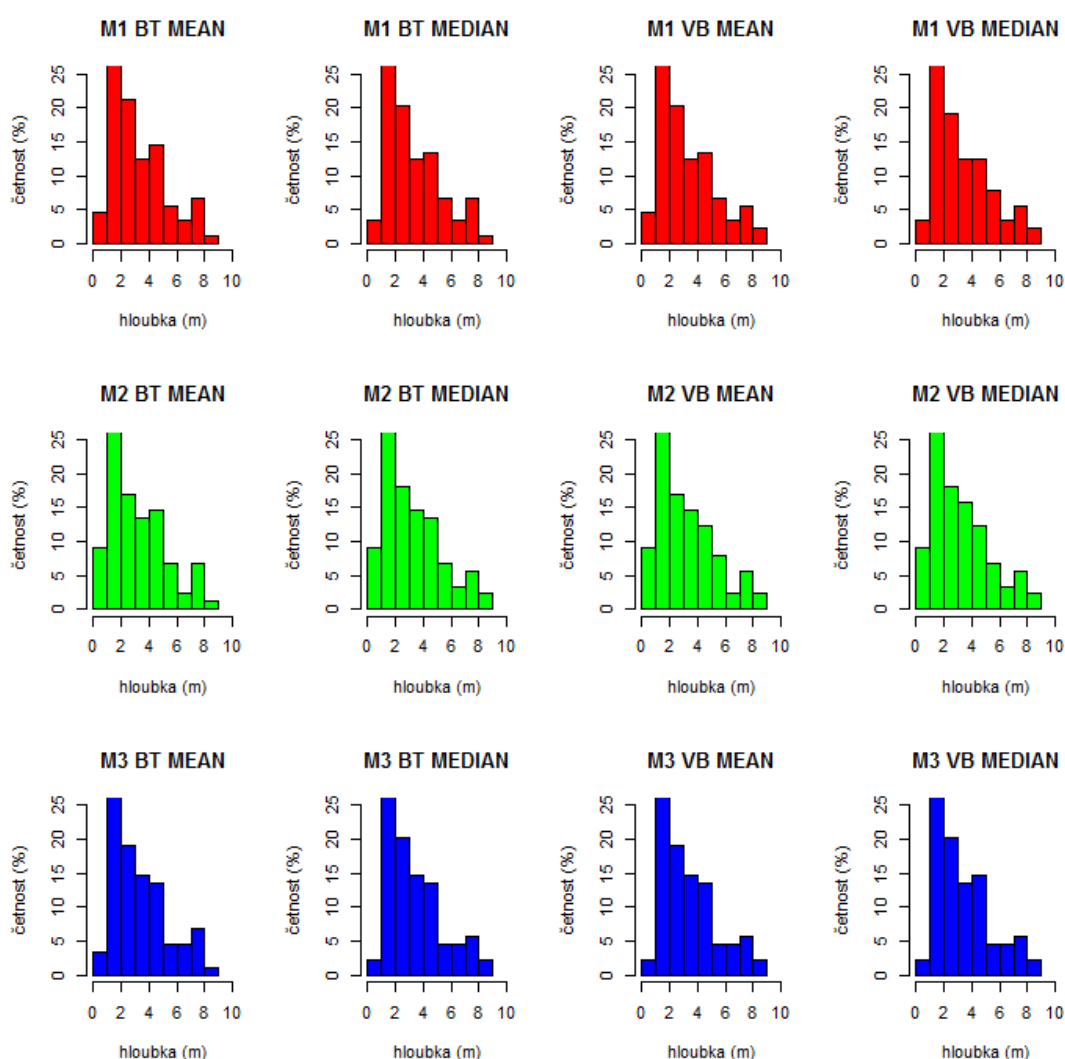
Tabulka 28: Sumarizace kontrolních dat pro rozlišení 10 m.



Obrázek 54: Histogramy kontrolních dat pro rozlišení 10m

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 5	0.49	1.43	2.58	3.18	4.475	8.105
M1 BT MEDIAN 5	0.49	1.43	2.59	3.187	4.53	8.12
M1 VB MEAN 5	0.44	1.43	2.58	3.199	4.513	8.175
M1 VB MEDIAN 5	0.44	1.44	2.56	3.207	4.52	8.18
M2 BT MEAN 5	0.535	1.353	2.567	3.154	4.39	8.07
M2 BT MEDIAN 5	0.57	1.38	2.57	3.177	4.39	8.14
M2 VB MEAN 5	0.54	1.363	2.59	3.159	4.35	8.19
M2 VB MEDIAN 5	0.57	1.42	2.59	3.181	4.32	8.29
M3 BT MEAN 5	0.4867	1.43	2.463	3.198	4.45	8.05
M3 BT MEDIAN 5	0.49	1.43	2.48	3.216	4.45	8.05
M3 VB MEAN 5	0.48	1.44	2.487	3.205	4.46	8.13
M3 VB MEDIAN 5	0.5	1.44	2.53	3.223	4.46	8.19

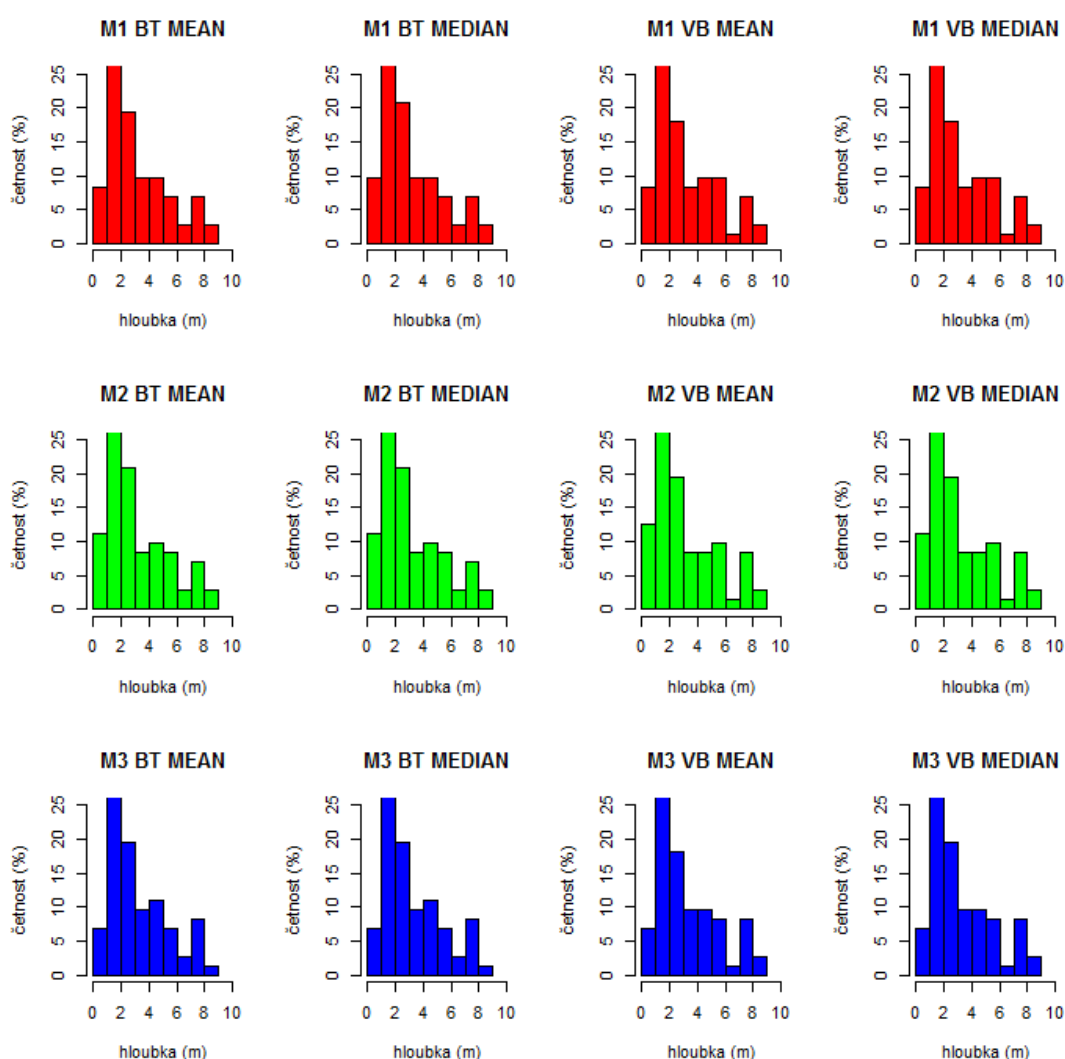
Tabulka 29: Sumarizace kontrolních dat pro rozlišení 5 m.



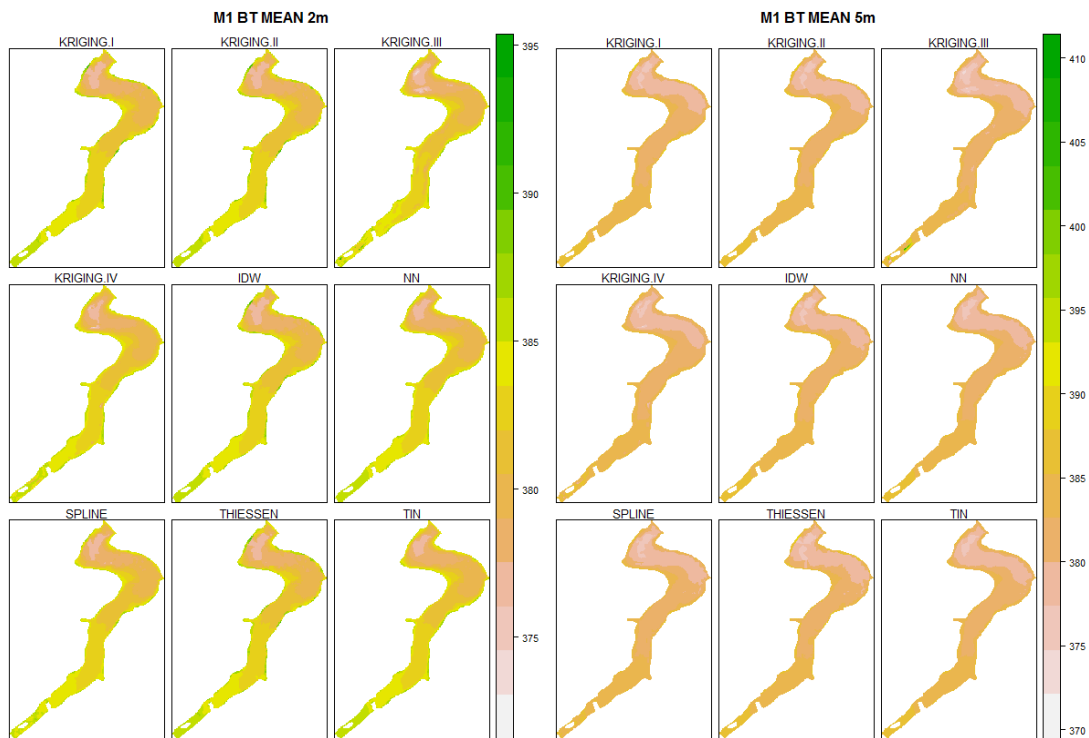
Obrázek 55: Histogramy kontrolních dat pro rozlišení 5m

	Min.	25% kvantil	Median	Mean	75% kvantil	Max.
M1 BT MEAN 2	0.5833	1.32	2.232	3.073	4.577	8.27
M1 BT MEDIAN 2	0.59	1.327	2.235	3.082	4.577	8.27
M1 VB MEAN 2	0.5633	1.327	2.2	3.084	4.677	8.4
M1 VB MEDIAN 2	0.57	1.327	2.225	3.089	4.677	8.4
M2 BT MEAN 2	0.56	1.248	2.235	3.033	4.55	8.3
M2 BT MEDIAN 2	0.56	1.248	2.235	3.039	4.55	8.3
M2 VB MEAN 2	0.55	1.245	2.215	3.068	4.635	8.42
M2 VB MEDIAN 2	0.55	1.245	2.23	3.076	4.635	8.42
M3 BT MEAN 2	0.5044	1.347	2.287	3.079	4.57	8.13
M3 BT MEDIAN 2	0.5	1.347	2.355	3.09	4.57	8.13
M3 VB MEAN 2	0.4756	1.288	2.275	3.108	4.87	8.35
M3 VB MEDIAN 2	0.52	1.288	2.31	3.117	4.87	8.35

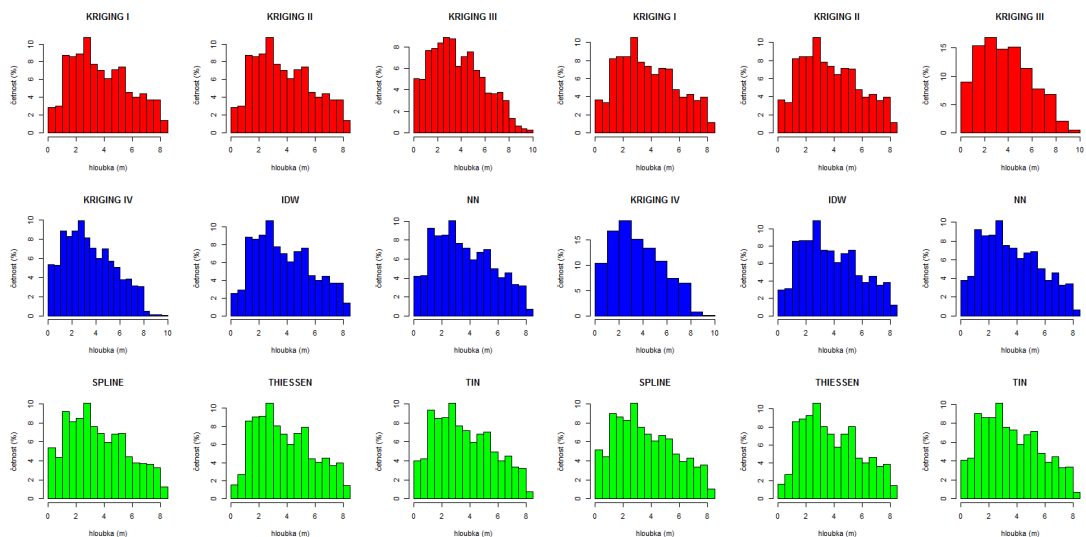
Tabulka 30: Sumarizace kontrolních dat pro rozlišení 2 m.



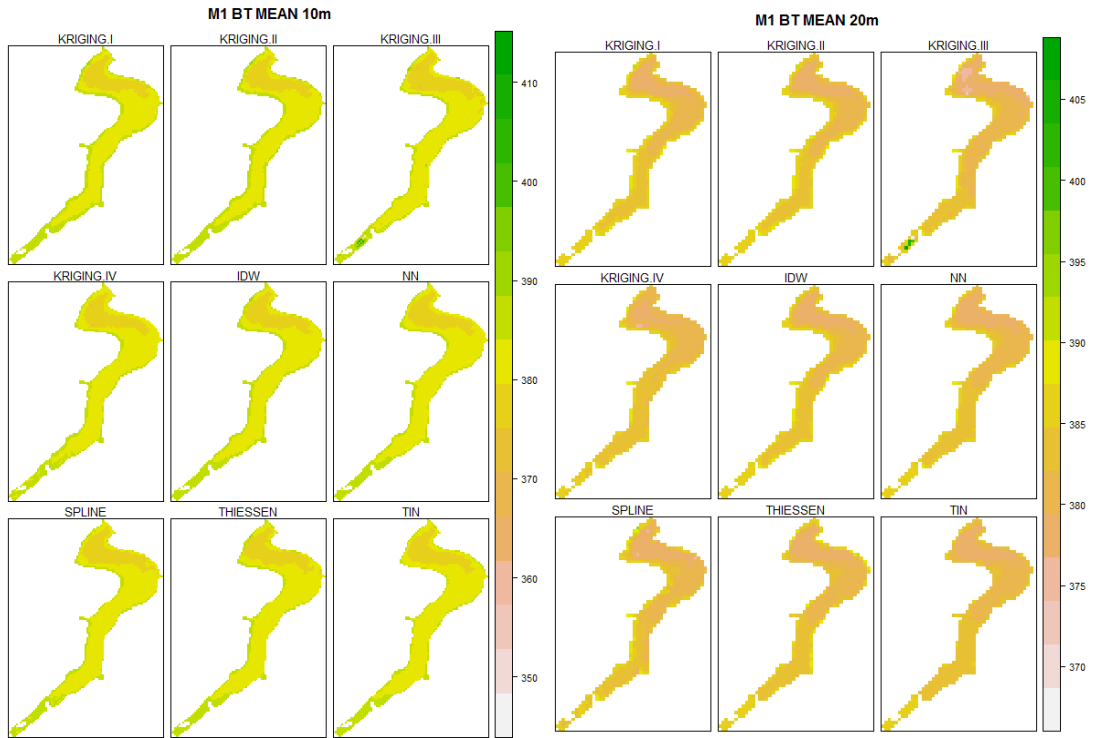
Obrázek 56: Histogramy kontrolních dat pro rozlišení 2m



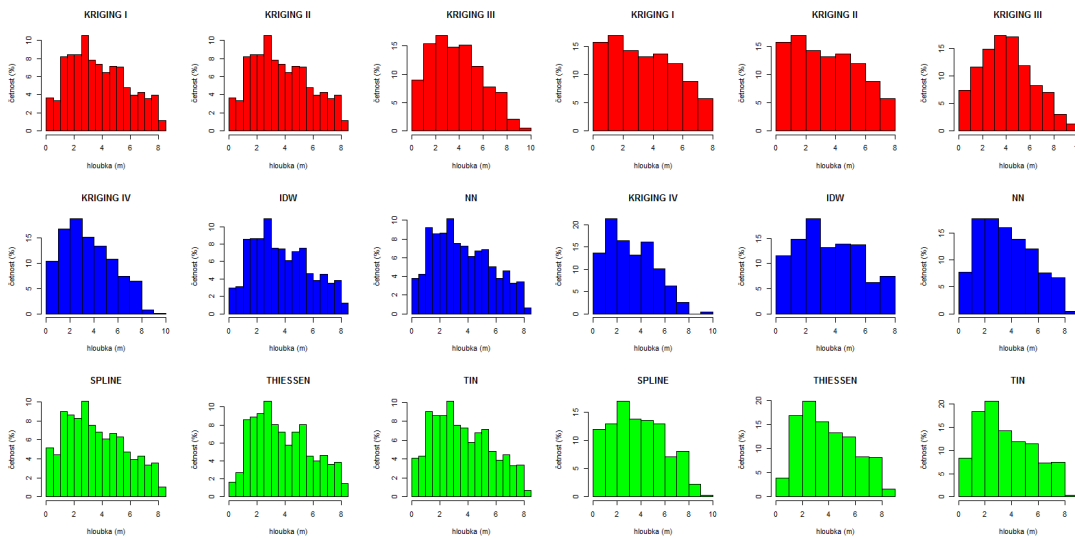
Obrázek 57: Přehled výsledných rastrů prvního měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



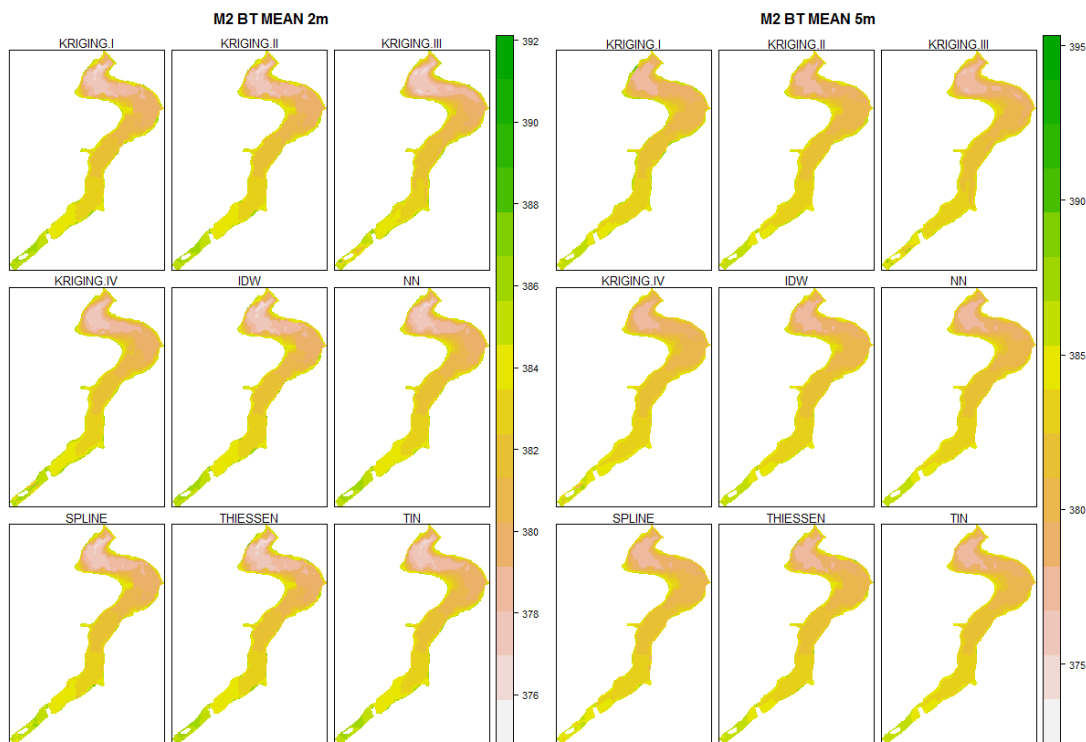
Obrázek 58: Histogramy prvního měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



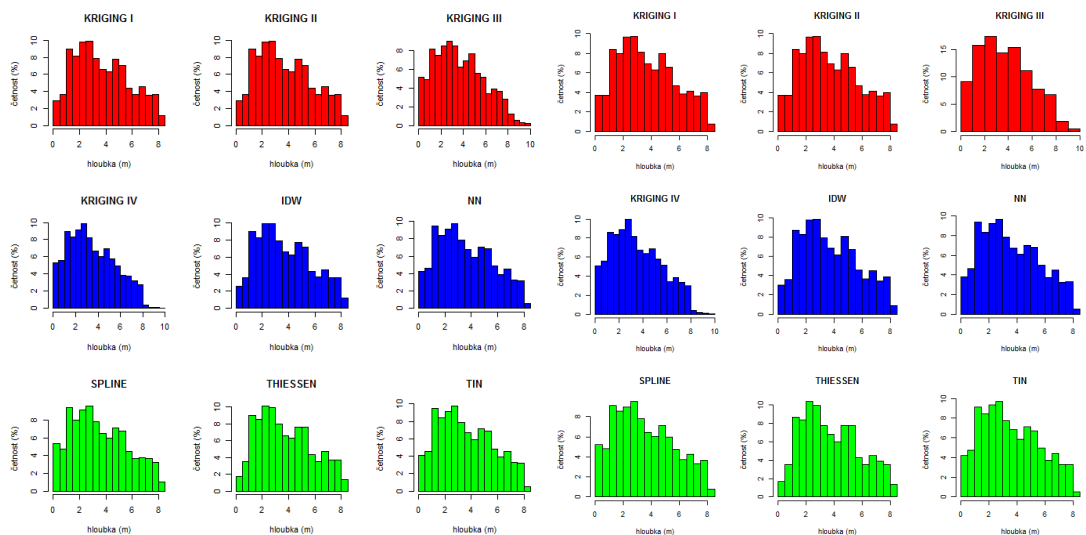
Obrázek 59: Přehled výsledných rastrů prvního měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



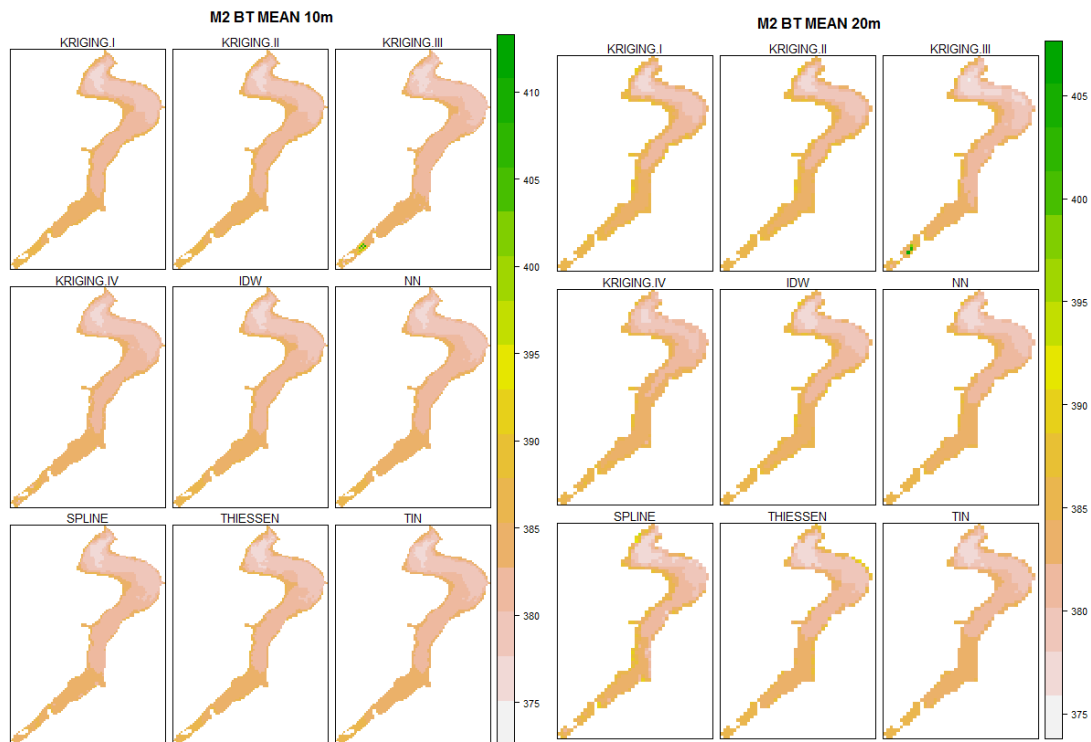
Obrázek 60: Histogramy prvního měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



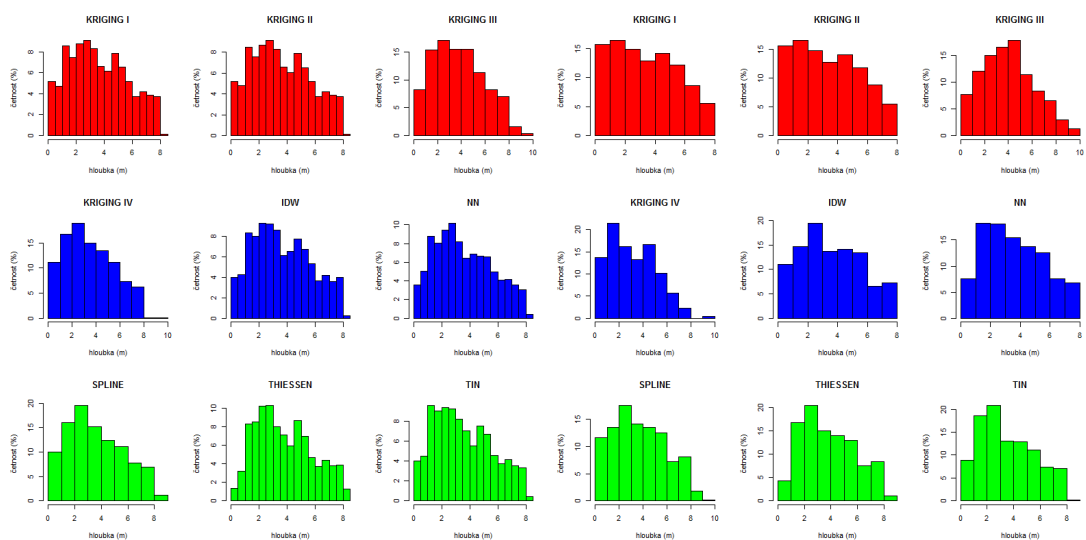
Obrázek 61: Přehled výsledných rastrů druhého měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



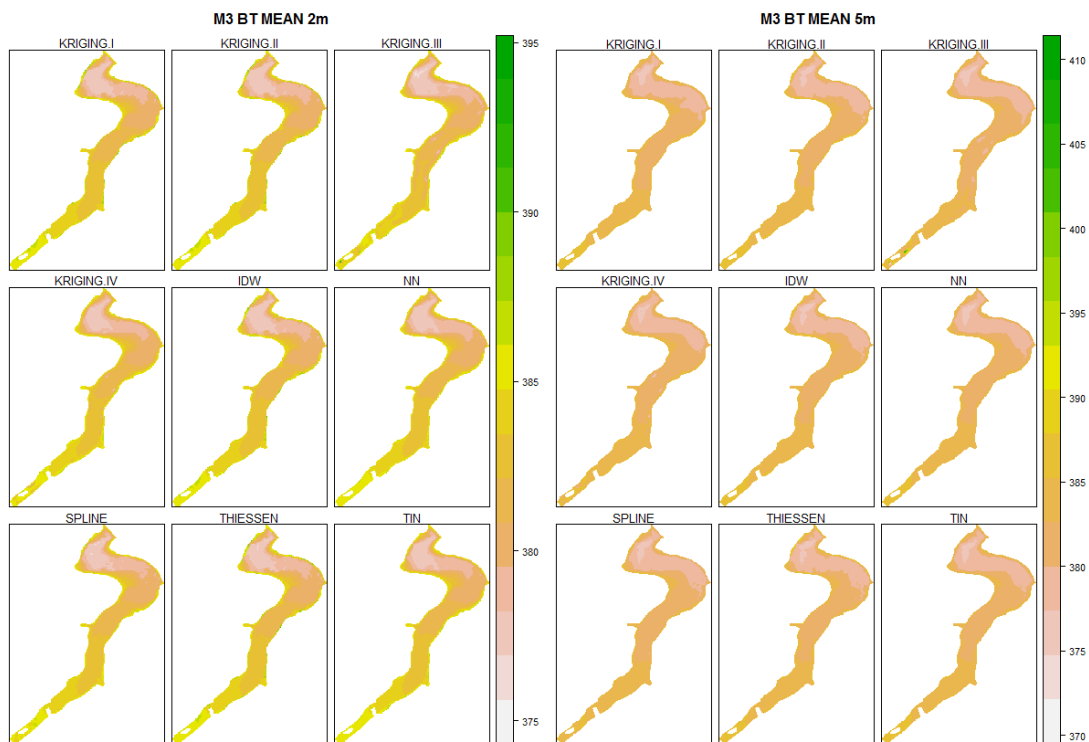
Obrázek 62: Histogramy druhého měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



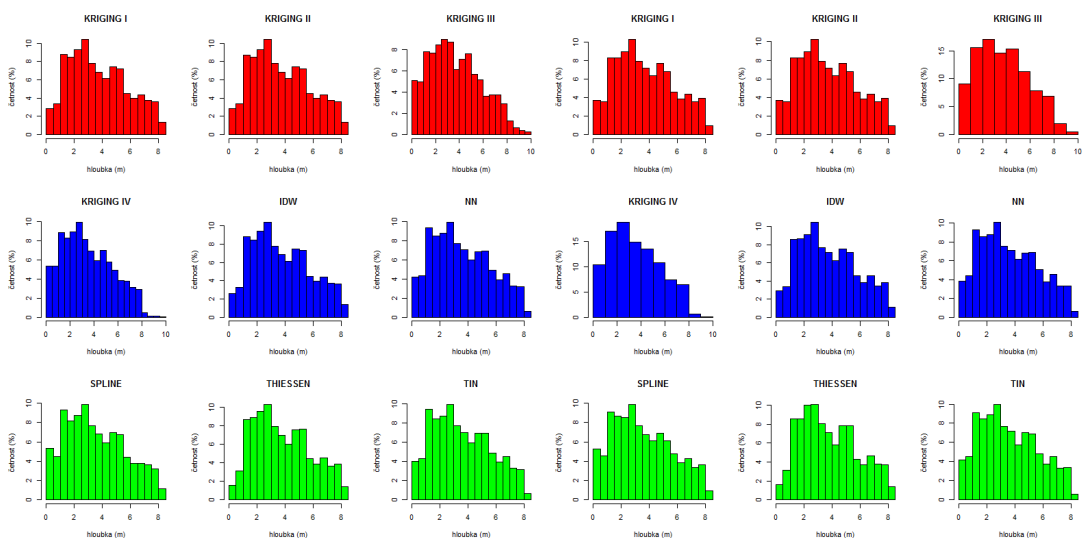
Obrázek 63: Přehled výsledných rastrů druhého měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



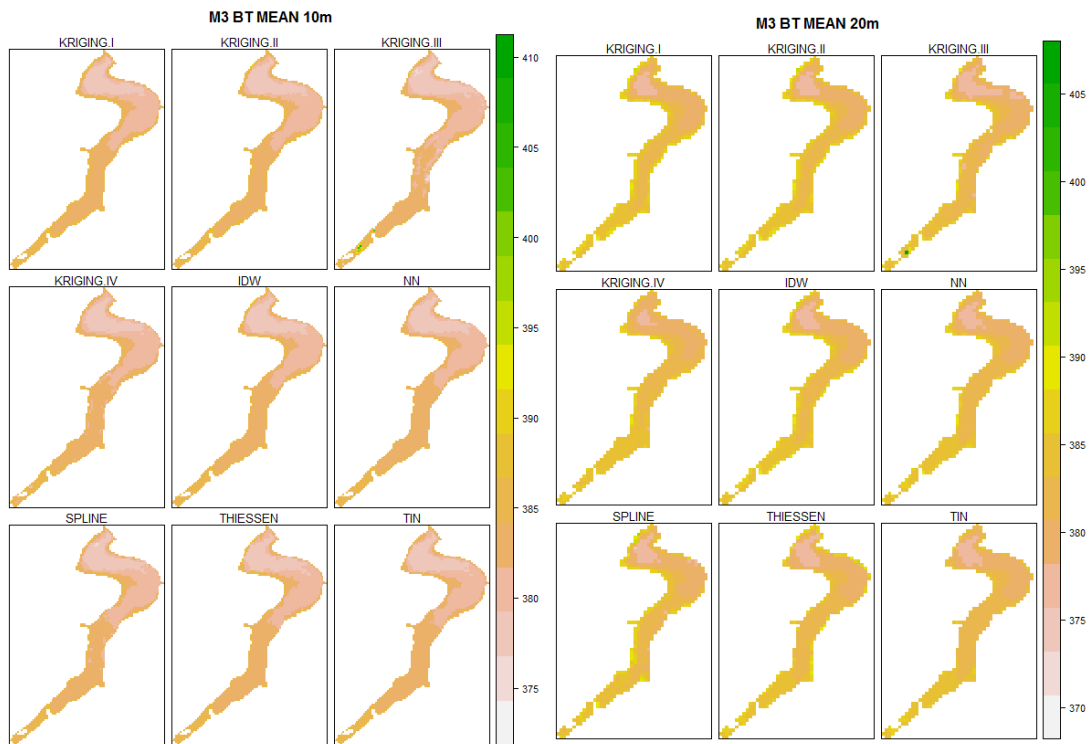
Obrázek 64: Histogramy druhého měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



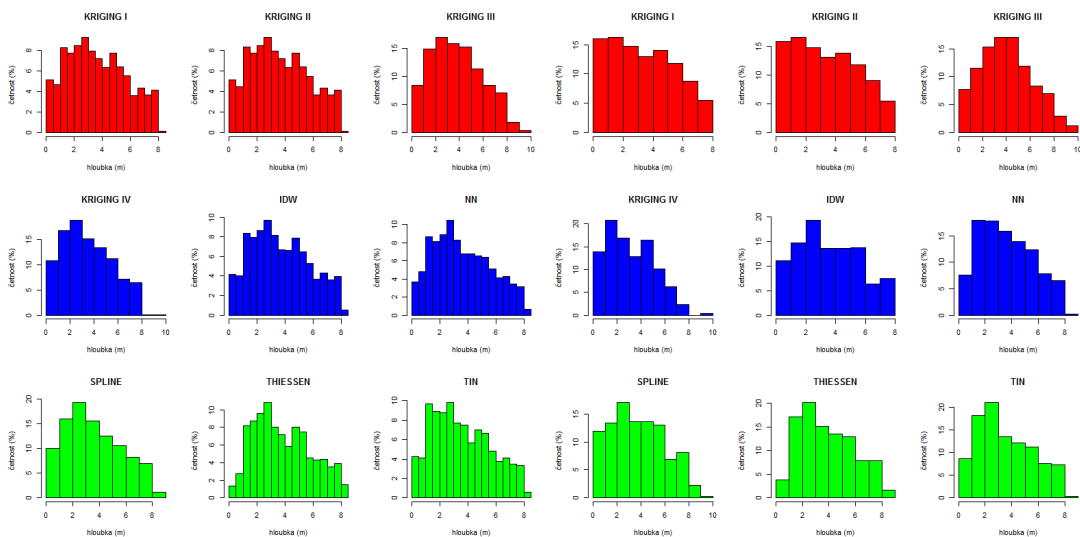
Obrázek 65: Přehled výsledných rastrů třetího měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



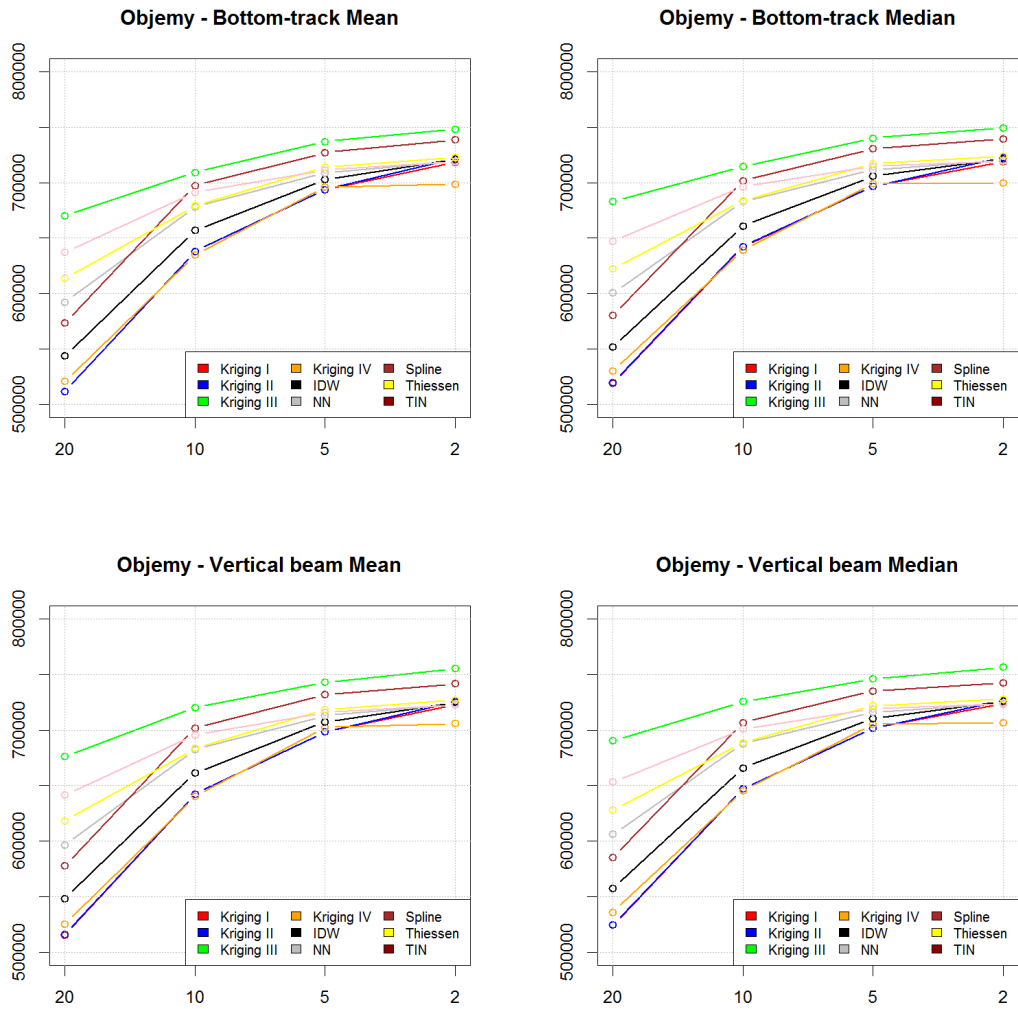
Obrázek 66: Histogramy třetího měření Bottom-track Mean pro rozlišení 2 a 5 m



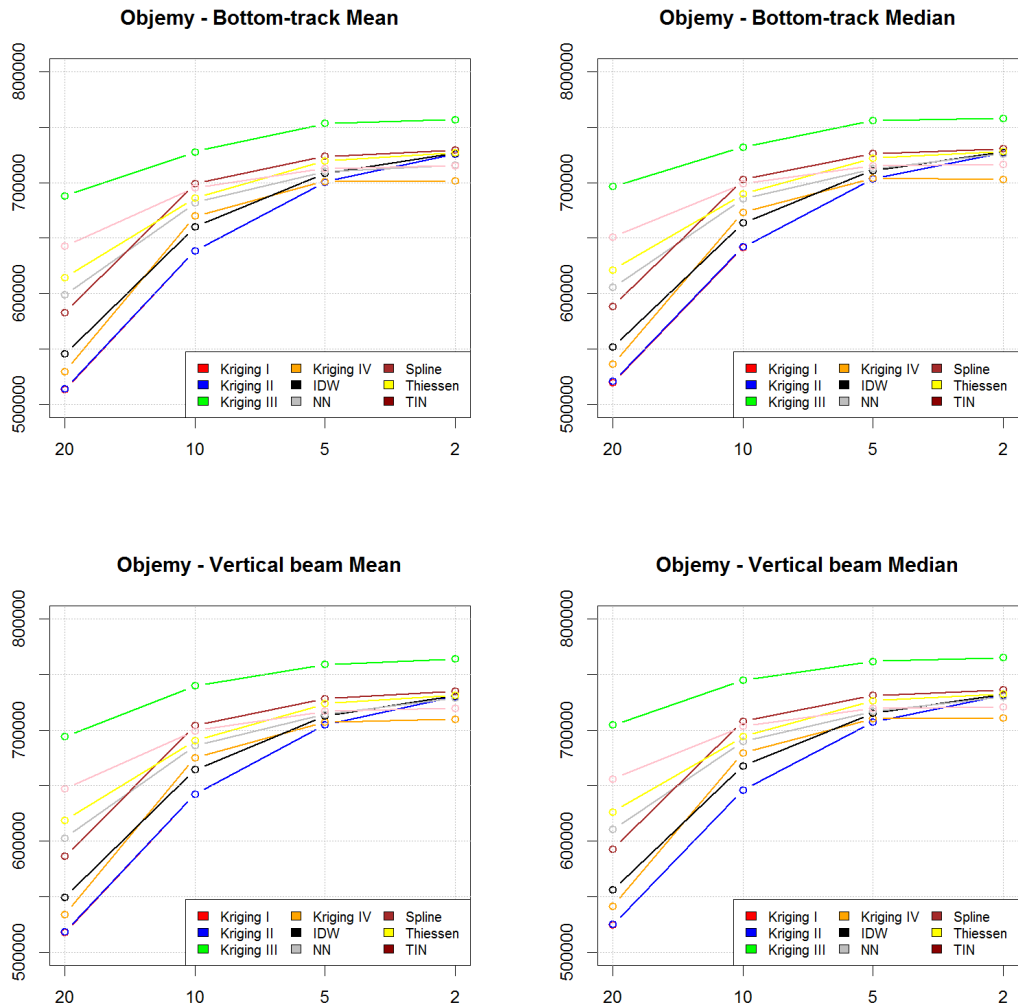
Obrázek 67: Přehled výsledných rastrů třetího měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



Obrázek 68: Histogramy třetího měření Bottom-track Mean pro rozlišení 10 a 20 m



Obrázek 69: Změny objemů nádrže jednotlivých metod pro různé sady dat v závislosti na rozlišení u druhého měření



Obrázek 70: Změny objemů nádrže jednotlivých metod pro různé sady dat v závislosti na rozlišení u třetího měření