

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



REFERENČNÍ BATYMETRICKÉ MĚŘENÍ NA MALÉ VODNÍ NÁDRŽI
STRNAD V POVODÍ LITOVICKO-ŠÁRECKÉHO POTOKA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Hradilek

Diplomant: Bc. Tomáš Milaberský

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tomáš Milaberský

Voda v krajině

Název práce

Referenční batymetrické měření na malé vodní nádrži Strnad v povodí Litovicko-Šáreckého potoka

Název anglicky

Referential bathymetry survey on small water reservoir Strnad in Litovicko-Šáreckém brook basin

Cíle práce

- Hlavním cílem bude získání referenčních dat pro nový způsob sběru batymetrických dat z ADCP pomocí referenční GPS namontované na soustavu vlastní výroby. Dále bude pomocí ADCP provedeno batymetrické zaměření malé vodní nádrže (MVN) Strnad v povodí Šárecko-Litovického potoka, vyhodnocení hloubek formou digitálního modelu terénu (DTM) dna MVN.
- Dílčím cílem bude zpracování rešerše zadané problematiky (MVN, batymetrie a způsoby jejího měření, zpracování DTM v prostředí GIS), a dále sepsání stručného metodického postupu při referenčním měření batymetrie MVN využitím ADCP.

Metodika

- Teoretická část bude zaměřena na shrnutí obecných poznatků k MVN a jejich zanášení, batymetrická měření a jejich způsoby využívané v praxi, způsoby tvorby DTM v prostředí GIS a popis interpolačních metod, z nichž bude vybraná jedna interpolační metoda, pomocí které bude vytvořen DTM dna nádrže. Výsledky měření pomocí River Surveyor(ADCP) budou porovnány s referenčním měřením skrze prostředí GIS. Bude následovat popis zájmové MVN Strnad.
- V rámci praktické části bude nádrž Strnad zaměřena využitím echosounderu RiverSurveyor M9 a zaměřená data budou zpracována v programu ESRI ArcGIS Desktop (extenze 3D Analyst). DTM dna MVN bude zpracován vybranou interpolační technikou.
- Dále bude vytvořeno zařízení pro referenční měření, které bude složeno z RTK GPS, měřicího soustavy a soulodí.

Doporučený rozsah práce

40-60 str

Klíčová slova

batymetrie, echosounder, ADCP, malá vodní nádrž, digitální model terénu

Doporučené zdroje informací

DEKKER A.G., et al. 2011: Intercomparasion of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australia and Caribbean coastal environments. Limnologic Oceanographic methods, Vol. 9, s. 396 – 425.

Erdem, H., 2013. RiverSurveyor S5 / M9 System Manual.

HUTCHINSON, M. F., T. I. Dowling. 1991: A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. Hydrological Processes 5, s 45–58.

VRÁNA K., BERAN J., 2013: Rybníky a účelové nádrže. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 150 s.

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Václav Hradilek

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2015

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 11. 04. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci nazvanou „Referenční batymetrické měření na malé vodní nádrži Strnad v povodí Litovicko-Šáreckého potoka“ vypracoval samostatně, pod vedením pana Ing. Václava Hradilka. Při realizaci mé diplomové práce jsem použil pouze materiály, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Praze dne

.....

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Václavu Hradilkovi, za trpělivost a cenné rady při realizaci mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům, kteří se podíleli na získávání dat v ní použitých. Nakonec bych chtěl poděkovat celé mé rodině, kamarádům a přítelkyni Lence za trpělivost a podporu během mého studia. Můj dík patří vám všem.

V Praze dne

.....

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá získáním referenčních dat pro nový způsob sběru batymetrických dat z echosounderu River Surveyor pomocí referenční GPS (globální polohovací systém), namontované na měřicí soustavu vlastní výroby. Měření probíhalo na malé vodní nádrži Strnad v povodí Litovicko–Šáreckého potoka. Dále je součástí práce batymetrické zaměření malé vodní nádrže Strnad pomocí echosounderu a vyhodnocení tohoto měření formou digitálního modelu terénu dna nádrže, za účelem výpočtu aktuální zásobní kapacity malé vodní nádrže Strnad. Referenční měření bylo provedeno na zvoleném příčném profilu nádrže Strnad pomocí GPS přijímače, namontovaného na měřicí soustavu, která se skládá z měřicího soulodí a soutyčí vlastní výroby. Samotné zaměření batymetrie celé nádrže bylo provedeno pomocí echosounderu namontovaného na speciálně upravené lodi. Srovnáním referenčních dat s daty naměřenými echosounderem bylo zjištěno, že měření batymetrie touto metodou je přesné, a tudíž je možné používat ho pro batymetrická měření v praxi. Batymetrickým zaměřením nádrže Strnad bylo zjištěno rozložení sedimentů v nádrži a potvrzen postupný trend zvyšování množství sedimentu v nádrži, respektive snižování akumulčního objemu. Hlavním přínosem této práce je potvrzení přesnosti měření batymetrie echosounderem River Surveyor. Na základě tohoto zjištění bude možné v budoucnu kontinuální sledování zásobních kapacit, množství a dynamiky sedimentů v malých vodních nádržích při minimálních finančních a časových nákladech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Batymetrie, Echosounder, Digitální model terénu, Referenční měření

ABSTRACT

This thesis addresses the issue of gaining reference data for the new method of gathering bathymetric data from River Surveyor echosounder using a reference GPS (global positioning system) attached to our own measuring device. Measuring was performed on a small water reservoir Strnad in the basin of Litovicko-Šárecký brook. In addition, the thesis contains bathymetric measurement of the small water reservoir Strnad by echosounder and evaluation of this measurement by means of a digital model of the reservoir floor terrain in order to calculate current storage capacity of the small water reservoir Strnad. Reference measurement was carried out on selected cross section of the Strnad reservoir using a GPS receiver attached to a measuring device which consisted of our own measuring boat coupling and rod coupling. Bathymetric measurement of the whole reservoir itself was performed by means of an echosounder attached to a specifically modified boat. Comparing reference data with the data acquired through the echosounder helped to find that bathymetric measurement using an echosounder is accurate and therefore it is possible to use it for bathymetric measurement in practice. Bathymetric measurement of the Strnad reservoir revealed sediment distribution in the reservoir and confirmed a gradual trend in the increase of sediment volume in the reservoir or decrease in water accumulation volume. The main contribution of the thesis is confirming the accuracy of bathymetric measurement by echosounder. Based on this finding it will be possible to monitor storage capacity, sediment volume and dynamics in small water reservoirs on an ongoing basis in future while spending minimum expenses and time.

KEY WORDS

Bathymetry, Echosounder, Digital terrain model, Referential survey

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
DTM	Digitální model terénu
MVN	Malá vodní nádrž
TIN	Nepravidelná trojúhelníková síť
např.	například
cca	cirka, asi, přibližně
tzv.	tak zvané
apod.	a podobně
tj.	to jest
resp.	respektive
IGA	Interní grantová agentura
TAČR	Technologická agentura ČR

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
1.1. Cíle práce a metodika.....	13
2. Základní charakteristika malých vodních nádrží	14
2.1. Malé vodní nádrže.....	14
2.2. Rozdělení MVN dle účelu.....	14
2.3. Rozdělení MVN dle způsobu zásobení vodou.....	15
2.4. Současné problémy MVN.....	16
3. Metody měření Batymetrie	20
3.1. Začátky Batymetrie	20
3.2. Geodetické metody	20
3.2.1. Tachymetrie	20
3.3. Akustické metody	21
3.3.1. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).....	22
3.4. Optické metody	24
3.4.1. Pasivní metoda (passive ocean color remote sensing).....	24
3.4.2. Aktivní metoda - LIDAR Batymetrie	26
3.5. Radarové metody	27
4. Přehled interpolačních metod bodových dat.....	29
4.1. Interpolace.....	29
4.2. Deterministické interpolační metody	29
4.2.1. Thiessenovy polygony	29
4.2.2. NATURAL NEIGHBOUR (metoda přirozeného suseda).....	30
4.2.3. IDW.....	31
4.2.4. SPLINE.....	33
4.2.5. Topo To Raster.....	34
4.3. Stochastické metody interpolace.....	36
4.3.1. KRIGING.....	36
5. DEM (Digital elevation model)	44
6. TIN (triangulated irregular network).....	46

7. Charakteristika zájmového území	48
7.1. Litovicko-Šárecký potok.....	48
7.2. Nádrž Strnad	49
8. Metodika.....	50
8.1. Metodika výroby soutyčí	51
8.1.1. Výpočet tlaku měřicího soutyčí na dno nádrže	52
8.2. Metodika výroby měřicího soulodí	53
8.3. Metodika referenčního měření.....	55
8.3.1. Postup měřičského týmu při získávání dat.....	55
8.4. Metodika zpracování dat v ArcGIS – referenční měření	57
8.4.1. Vizualizace dat v R – referenční měření	59
8.5. Metodika zpracování dat vArcGIS – Batymetrie nádrže	59
9. Výsledky.....	61
9.1. Referenční měření.....	61
9.1.1. Vyhodnocení zpracovaných dat – referenční měření.....	61
9.2. Batymetrie nádrže	66
9.2.1. Vyhodnocení zpracovaných dat	66
10. Diskuze.....	70
11. Závěr	72
12. Literatura a použité zdroje	73
13. Seznam obrázků.....	80
14. Seznam tabulek	81
15. Přílohy.....	82

1. ÚVOD

Jedním z nejpálčivějších problémů, které postihují malé vodní nádrže (MVN), je bezpochyby jejich zanášení. V současné době se tento problém dostává do popředí zájmu jak státních institucí, tak odborné veřejnosti. Po dlouhých letech nezájmu o tento problém lze konstatovat, že většina českých MVN je sedimentem zanesena do té míry, že nemůže plnit funkci, pro kterou byla budována.

Je to hlavně zmenšování objemu MVN, co má vliv na objem vody, který mohou MVN zachytit při hydrologicky extrémních situacích jako jsou povodně. Dalším faktorem je, že zanášení MVN má bezpochyby vliv na kvalitu vody nejen v samotné MVN, ale také v toku pod ní.

Zjišťování množství sedimentů se ve většině případů provádí tak, že se MVN vypustí, a následně se zjišťuje jejich mocnost nebo se používají sondážní tyče (tzv. sondýrky), které se vsunou do sedimentu a pomocí nich se sleduje jeho mocnost. Dalším způsobem může být měření hloubek MVN a na základě dokumentace, kde je popsán původní stav, lze odvodit, jakou má sediment mocnost. Touto skupinou metod se zabývá tato práce.

V začátcích měření hloubek byly používány velmi jednoduché metody, jako například olovnice na provazu, kdy olovnice dosáhla dna a odečítalo se, jaká délka provazu je ponořena. Tato metoda je bez pochyb metodou velice časově náročnou a nepřesnou. S vývojem vědy přišly metody, které celé měření zpřesnily, ovšem časová náročnost zůstala. Jedná se hlavně o geodetické metody jako je tachymetrie. V současné době prakticky není žádná metoda běžně použitelná v praxi, pomocí které by se dalo měřit zanášení MVN, kontinuálně (ve stanovených časových intervalech) a pružně reagovat na aktuální situaci. Představme si situaci, kdy spravujeme soustavu MVN, přičemž k zanášení jednotlivých MVN dochází rozdílným tempem. Vzniká tedy potřeba zjistit, kolik sedimentu se v jednotlivých MVN nachází. Je možné použít nějakou metodu, která se dnes běžně používá (především metody geodetické). Nicméně zaměření například soustavy deseti MVN těmito metodami by bylo ve všech směrech (časově, finančně, atd.) velice náročné.

V těchto souvislostech vzniká potřeba uvést do praxe metodu, kterou by se dalo do jisté míry kontinuálně, a přitom co nejjednodušší formou a při minimálních nákladech, sledovat stav sedimentů v MVN a rychlost jejich nárůstu, a na základě

těchto dat stanovovat doporučení, která pomohou usnadnit rozhodovací proces, při kterém lze stanovit, které MVN potřebují odbahnění prioritně, a případně i stanovit úpravy v okolí MVN (v povodí) k zamezení nebo omezení zanášení.

Jednou z metod, která by se dala k těmto účelům použít, je echosounding, neboli měření hloubek za pomoci zvukových vln. Mezi metody, které pracují na principu echosoundingu, lze zařadit přístroj, který se označuje ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Díky této metodě by mohlo být možné zkoumat batymetrii MVN poměrně jednoduše, rychle a zároveň při minimálních finančních a časových nákladech. Bylo by možné například provádět měření ve dvouměsíčních intervalech a sledovat nárůst nánosu sedimentů v MVN, a na základě těchto dat provést patřičné kroky. Nicméně s novými metodami měření přichází i několik otázek. Do jaké míry je měření touto metodou přesné? Je schopna tato metoda udávat relevantní výsledky, na základě kterých lze provést relevantní rozhodnutí? Na tyto otázky se tato práce pokusí najít odpověď.

Předpoklad, který vyplyne z této práce, je fakt, že se podaří prokázat do jaké míry je měření batymetrie metodou ADCP, resp. echosounderu přesné. Aby bylo toto možné, bude v rámci této práce vypracován postup referenčního měření, které bude porovnáno s měřením echosounderem, a na základě tohoto porovnání bude možné sestavit odpovědi na otázky položené výše.

Pokud se podaří prokázat, že měření pomocí echosounderu je přesné, bude možné tuto metodu zavést do praxe a sledovat dynamiku zanášení MVN a obecně měřit batymetrii MVN rychlým a nenáročným způsobem. Pokud se toto podaří prokázat, bude to mít velký význam pro vodohospodářskou praxi, kdy na základě takto získaných dat bude možné rozhodovat, které MVN potřebují odbahnění prioritně, a rovněž bude možné vypracovávat na základě těchto dat projekty na odbahnění MVN a částečně tím eliminovat náklady spojené s průzkumem MVN, například geodetickými metodami.

Tato práce je součástí plánovaného výstupu projektu IGA pod názvem 20154242 – Batymetrie soustavy malých vodních nádrží (MVN) na povodí Šárecko-Litovického potoka, přičemž tento projekt má návaznost v rámci spolupráce na TAČR TA 04020042 –(2014-2017) Nové technologie batymetrie vodních toků

a MVN pro srovnání jejich zásobních kapacit a sledování množství a dynamiky sedimentů.

1.1. Cíle práce a metodika

Cílem této práce je vypracovat metodiku a provést referenční měření batymetrie vybrané MVN, které se následně porovná s moderní metodou měření batymetrie pomocí echosounderu. Cílem práce je rovněž vytvoření pomůcek k tomuto měření. Dílčím cílem této práce je zaměření batymetrie vybrané MVN pomocí echosounderu s časovým odstupem několika měsíců a porovnání těchto dvou měření.

V rešeršní části práce je specifikován pojem malé vodní nádrže (MVN) a jsou popsány současné problémy MVN související s tématem práce. Dále jsou popsány současné metody měření batymetrie a interpolační metody, se kterými pracuje program ArcGis a několik pojmů, které souvisejí s tématem práce. Je zde také popsána metodika výroby měřících pomůcek, metodika získávání a zpracování dat, a také metodika zpracování dat v programu ArcGis. V rámci práce byly též vytvořeny měřící pomůcky, a to měřící soutyčí a měřící soulodí. Tyto pomůcky byly použity pro referenční měření.

Získané výsledky z měření jsou zde vyhodnoceny, prezentovány a diskutovány. Diskutovány jsou rovněž možné postupy, kterými by se dala zlepšit přesnost měření.

2. Základní charakteristika malých vodních nádrží

2.1. Malé vodní nádrže

Dle normy ČSN 75 2410 lze označit za malou vodní nádrž (MVN) takovou nádrž, která splňuje tyto dvě podmínky:

- Objem nádrže po hladinu ovladatelného prostoru (normální hladinu) není větší než 2 mil. m³.
- Největší hloubka nádrže nepřesahuje 9 m (tj. svislá vzdálenost nejnižší položeného místa dna nádrže od maximální hladiny, přitom se neuvažují lokální větší hloubky v místě původního koryta, hlavní rybniční stoky, apod.) (ČSN 75 2410).

Norma neplatí pro nádrže přečerpávacích vodních elektráren, pro odkaliště, a pro nádrže s přítokem a odtokem propustným horninovým prostředím dna a svahů nádrže (ČSN 75 2410).

2.2. Rozdělení MVN dle účelu

Jak uvádí norma ČSN 75 2410, MVN se dle účelu dělí na:

- Zásobní
- Ochranné
- Rybochovné
- Nádrže upravující vlastnosti vody
- Hospodářské
- Speciální účelové nádrže
- Asanační
- Rekreační
- Nádrže na ochranu fauny a flory
- Nádrže krajinytvorné a v obytné zástavbě

2.3. Rozdělení MVN dle způsobu zásobení vodou

Podle Tlapáka et Herynka (2002) se MVN dle přivádění vody dělí na:

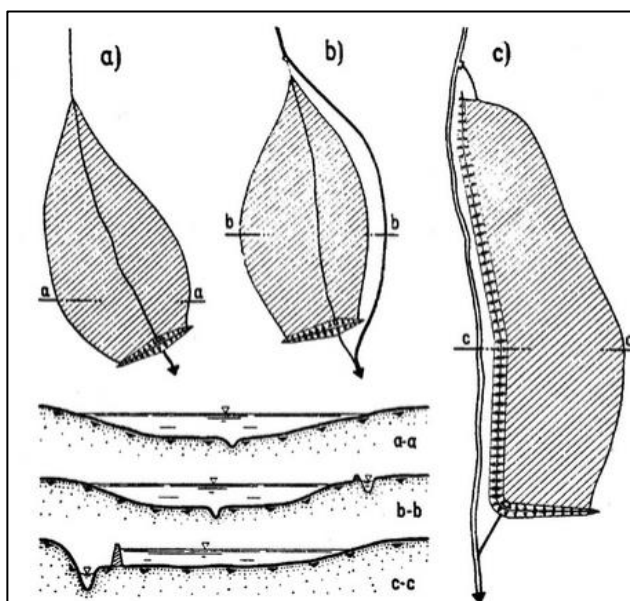
- Dešťové
- Pramenné
- Říční nebo potoční

Dešťové nádrže, někdy též označované jako nebeské, jsou charakteristické tím, že jsou zásobeny vodou pouze atmosférickými srážkami nebo z odtávajícího sněhu, tzn. že nemají žádný přítok. Tento fakt určuje potřebné parametry tohoto typu nádrže. Nádrže by měly mít strmé svahy, nepropustné dno, a musí být dostatečně hluboké, aby se co nejvíce zabránilo výparu a průsaku. Z hospodářského hlediska jsou tyto nádrže velice významné. Tající sníh se zde akumuluje a vodu lze následně využívat. Mohou také zmírňovat erozní ohroženost díky zachytávání přívalových srážek (Šálek et al., 1989).

Zdrojem pro zásobování pramenných nádrží jsou podzemní vody, které do nádrže vyvěrají buď dnem nádrže, nebo břehy. (Tlapák et Herynek, 2002).

Plnění říčních a potočních nádrží je zajištěno vodou z potoků a řek. Tyto nádrže se dále podle Vrány (1998) dělí na:

- Průtočné
- Neprůtočné (boční)



Obrázek 1: Dělení nádrží dle přítoku

Průtočné nádrže jsou zřízeny přímo na tocích. U těchto nádrží je náchylnost na zanášení sedimenty největší. Nádrže, které neleží přímo na toku, jsou nádrže neprůtočné neboli boční, přičemž tyto nádrže mají vlastní napájecí kanál (Tresová, 1978).

2.4. Současné problémy MVN

V současné době je většina MVN v ČR ve velmi špatném stavu. Pro nynější stav existuje několik důvodů. Jsou to dlouhotrvající nezáměr o údržbu MVN a v neposlední řadě malé množství peněžních nástrojů, které byly do údržby MVN v minulosti vkládány (Šálek et al., 1989).

Podle Vrány (1998) se v současnosti vyskytují tyto problémy MVN:

- Problémy vodohospodářské
- Problémy technické
- Problémy ekologické
- Problémy ekonomické
- Problémy majetkoprávní
- Problémy legislativní

Jelikož se tato práce zabývá měřením batymetrie MVN budou podrobně popsány pouze problémy vodohospodářské, které souvisí s problematikou probíranou v této práci. Ostatní problémy jsou zde vyjmenovány pouze informativně.

Jedním z hlavních současných problémů MVN je bezpochyby jejich zanášení. Příčinou zanášení MVN jsou erozní procesy zejména zemědělské půdy v povodí, ve kterém se nádrž nachází (Tlapák et Herynek, 2002). Podle Vrány (2013) jsou vzrůstající procento využití půdy jako orné, vytváření velkých půdních celků, pěstování plodin, které jsou náchylné na působení erozních vlivů, používání nevhodné agrotechniky, a v neposlední řadě také používání průmyslových hnojiv a ochranných látek, hlavní projevy intenzifikace zemědělství. Právě intenzifikace zemědělství je jednou z hlavních příčin erozních procesů v povodí. Tyto faktory významně přispívají k rozrušování půdy a odnosu půdních částic (rozpuštěné a nerozpuštěné látky) do vodních toků a jejich následný transport do MVN, kde se díky snížení rychlosti proudění ukládají. Ukládání většiny těchto látek působí negativně jak na samotnou MVN, tak také na vodní tok pod hrází, a to například

z hlediska kvality vody. Transportované půdní částice mají následně na MVN negativní vlivy (fce. nádrže, kvalita vody), které lze popsat následovně (Vrána et Beran, 2013):

- Usazené částice ve velkém množství obsahují živiny, případně toxické látky, přičemž tyto látky se mohou uvolňovat zpět do prostředí (vodného prostředí).
- Zásobní prostor nádrže je sedimenty zmenšován, což mění hydraulickou fci. nádrže.
- V případě, kdy dojde k poklesu hladiny vody v nádrži, může dojít k odkrytí sedimentů, které mají, jak již bylo řečeno, velký obsah živin. Pokud dojde k odkrytí sedimentů následuje poměrně rychlé zarůstání vegetací. V případě následného vzestupu hladiny dojde k ponoření vegetace a k jejímu odumírání a rozkladu.
- Vlhkomilná vegetace vykazuje velký nárůst, což má poté vliv na využitelnou zásobu vody a ovlivňuje též objem výparu.
- Zanášení sedimenty ovlivňuje správný chod funkčních objektů (Tlapák et Herynek, 2002)

Negativním vlivem těchto procesů na celé povodí je bezpochyby snížení úrodnosti půd vlivem odnosu živin, které se hromadí v MVN, ze kterých se zpět do oběhu dostávají velmi zřídka (Vrána et Beran, 2013).

V tabulce 1 je znázorněno porovnání množství sedimentů v MVN mezi lety 1962 a 1992 podle Vrány et Berana (2013):

1962	1992	Rozdíl
182 943	196 188	+13 245

Tabulka 1: Objem sedimentů v MVN ČR (tis. m³) (Vrána et Beran, 2013).

Jak ukazuje tabulka 1, za rok se množství sedimentů zvyšuje zhruba o 359 tis. m³. Z tohoto faktu vyplývá potřeba ročně odtěžit minimálně toto množství sedimentu k zachování současného stavu (Tlapák et Herynek, 2002).

Zanášení MVN je historicky pozorováno od té doby, co se vodní nádrže začaly používat k rybníkářství. Od této doby je také chápáno jako jev přirozený. Podle Vrány (1998) bylo v minulosti přirozenou věcí zbavování se těchto nánosů, tedy odbahňování MVN, přičemž vytěžené nánosy byly rozprostřeny po zemědělských pozemcích a zaorány. V dnešní době je situace diametrálně rozdílná. Díky intenzifikaci zemědělství a jiným faktorům nabylo zanášení MVN poměrně velkých rozměrů. Dalším faktorem současného stavu je fakt, že o nahromaděný sediment není zájem a v mnoha případech, kdy se v sedimentu vyskytuje nadlimitní množství nebezpečných látek, je jeho likvidace řízena předpisy o nakládání s nebezpečnými odpady (skládky nebezpečného odpadu), tudíž je jeho likvidace velmi složitá (Vyhláška č. 294/2005). Z těchto důvodů je v současné době většina MVN zanesená velkým množstvím sedimentu. Podle Vrány (2013) je v současné době akumulací prostor všech MVN vlivem usazování sedimentů snížen téměř o jednu třetinu (Vrána et Beran, 2013).

Vrána (1998) rozděluje hlavní příčiny zanášení do tří kategorií:

- Břehová abraze
- Vnitřní zanášení
- Zanášení přítokem

Pod pojmem břehová abraze si lze představit zejména jevy, které strukturálně narušují celistvost břehové hrany, a to hlavně vlnové jevy. Vlnové jevy narušují břehy a následně uvolňují části zemin, které poté klesají do akumulacího prostoru MVN. Vznik tohoto druhu abraze je závislý na pedologickém složení svahu, na tom jaký má svah pokryv, na jeho sklonu a délce, a v neposlední řadě také na kolísání hladiny a antropogenní činnosti. Záleží také na velikosti vodní plochy a směru převládajících větrů, protože tyto faktory ovlivňují vznik vlnových jevů. Tomuto typu zanášení lze zabránit například opevněním břehové linie či ochránit břehovou linii trvalým travním porostem (Tresová, 1978).

Druhým faktorem ovlivňujícím zanášení MVN je vnitřní zanášení. Na tomto způsobu zanášení se podílí organismy, živočichové a v neposlední řadě i rostliny, které se v nádrži vyskytují. K životnímu cyklu organismů, jako jsou například sinice nebo řasy, patří procesy, jako růst, vývoj a odumírání a následný rozklad biomasy. Výsledkem těchto procesů je nárůst množství sedimentů v nádrži. Díky tomu, že se

v nádrži vyskytuje nadbytek živin (důsledek hnojení zemědělské půdy a následného splachu), organismy se v nádrži vyskytují ve velkém množství, což ve výsledku znamená větší množství vznikajícího sedimentu. Látky podporující vyživování organismů jsou zejména dusík a fosfor, na jejichž bázi je většina hnojících prostředků založena. Důsledkem tohoto je proces, který je nazýván eutrofizace. Odumírající flora vytváří tzv. organominerální kal, který je též označován jako sapropel. Jak uvádí Vrána (1998), roční přírůstek takto vzniklého kalu může činit 1 až 2 cm (Tlapák et Herynek, 2002).

Posledním základním zdrojem zanášení MVN sedimentem je zanášení přítokem. Zanášení tímto druhem je významné především u průtočných MVN. Eroze zemědělských či lesních pozemků, plochy rozrušené těžkou mechanizací či jinými faktory, nebo zastavěné plochy a splachy z nich, to jsou hlavní příčiny této kategorie zanášení. Všechny tyto částice lze obecně označit jako částice, které se dostávají do vodního toku a následně do MVN splachem z celé plochy povodí. Takto vzniklé částice se označují jako splaveniny a plaveniny. Přítokem do MVN a usazením v ní se ze splavenin a plavenin stává sediment (Vrána et Beran, 2013).

3. Metody měření Batymetrie

3.1. Začátky Batymetrie

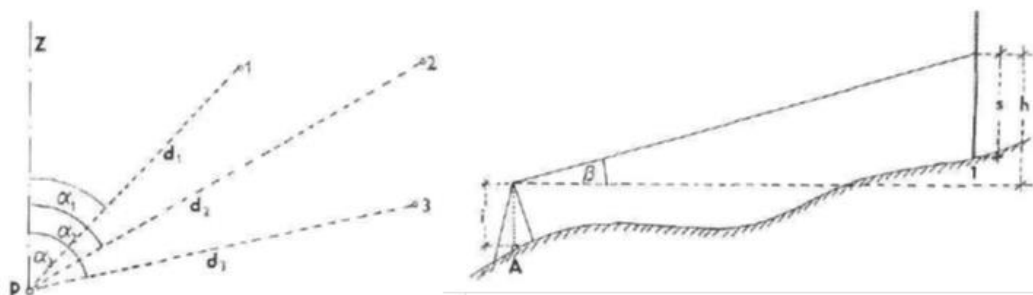
V počátcích měření hloubek se pro jejich měření používaly olovnice a provaz. Princip metody spočíval v tom, že olovnice přivázaná na provaz o známé délce se spouštěla do vody. Na základě délky ponořené části lana se následně odečítala hloubka v místě měření. Jednalo se o metodu velmi nepřesnou a metodu, která měří hloubku jen v jednom určitém bodě (Encyclopaedia Britannica, 1987).

3.2. Geodetické metody

3.2.1. Tachymetrie

Podle Douška et. Matějika (2005) je tachymetrie měřická metoda vhodná k zaměřování terénního reliéfu zemského povrchu. Z této definice vyplývá, že tachymetrií je možné provádět i batymetrická měření. K využití tachymetrie v praxi dochází v případech, kdy je potřeba zaměřit polohopis i výškopis současně. Výstupem těchto měření je plán výškopisu a polohopisu, který je možné použít k vytvoření batymetrických map (Nevosád et Vitásek, 2000).

Jak již bylo řečeno, při tachymetrickém měření dochází k současnému měření výšky a polohy v jednotlivých bodech. K určení polohy bodů se používají polární souřadnice a k určení výškových souřadnic povětšinou trigonometrie (Nevosád et Vitásek, 2000). Na obrázku 2 je zobrazen princip určování polárních souřadnic. Přístroj P se nachází na místě o známých souřadnicích a výškách. Z tohoto místa se od základního směru Z měří vodorovný úhel α a vzdálenost d od přístroje. Princip trigonometrie je zobrazen na obrázku 2 (Doušek et Matějík, 2005).



Obrázek 2: Princip tachymetrie

Prvky, které slouží k výpočtu výšky a polohy, jsou vodorovný úhel α , laťový úsek l a výškový úhel β . V současné době se používají k měření tohoto druhu totální stanice a odrazný hranol. Odrazný hranol se umístí na měřicí tyč a pomocí totální stanice a odrazu paprsku od odrazného hranolu přístroj vypočítá souřadnice hledaného bodu (Doušek et Matějík, 2005).

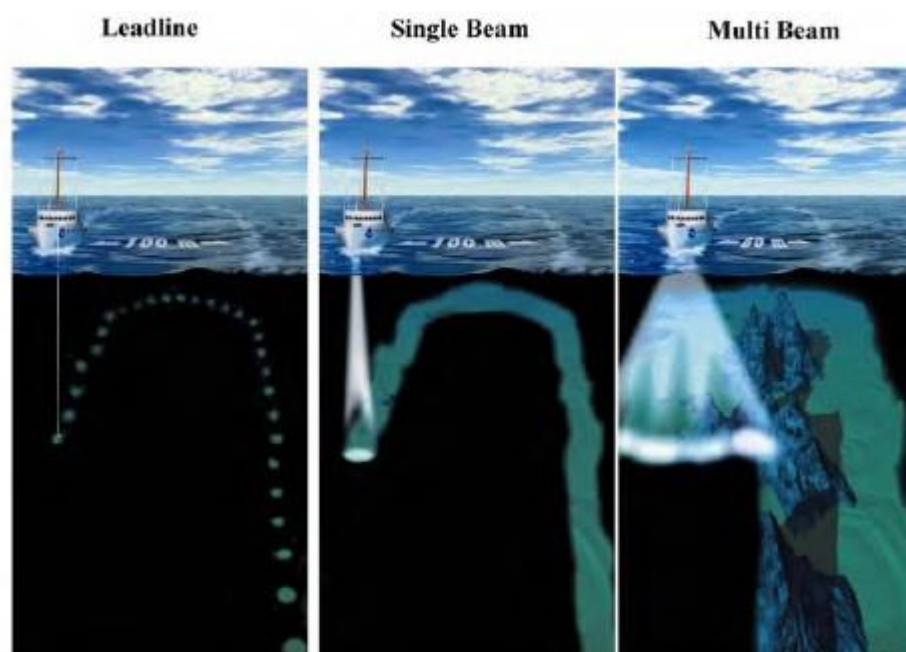
3.3. Akustické metody

Akustická Batymetrie se začala používat v praxi v roce 1920, kdy se začala používat k určování konfigurace dna (Dierssen et Theberge, 2011). Počáteční technikou bylo vyslání jediného zvukového pulzu a následné měření času mezi vysláním pulzu, jeho odrazem ode dna a návratem pulzu do lodního hydrofonu. Polovina tohoto času byla vynásobena rychlostí zvuku a výsledkem byla hloubka v daném místě. Jak konstatoval Leonardo da Vinci v roce 1490 a později Benjamin Franklin v roce 1762, zvuk dokáže cestovat ve vodě na delší vzdálenost a s menším útlumem než ve vzduchu (Smith & Sandwell, 2004).

Dalším faktorem opodstatňujícím zvukové metody je fakt, že zvuk cestuje ve vodě podstatně rychleji než na vzduchu. Díky těmto faktorům pohybu zvuku ve vodě mohou být měřeny i velké hloubky, a to bez podstatné degradace signálu. Nicméně zde existuje několik faktorů, které mohou ovlivňovat rychlost zvuku ve vodě, jako například teplota vody, tlak v určité části vodního sloupce, a další faktory. Kromě faktorů, které ovlivňují rychlost zvuku a tím pádem zanášejí nepřesnost do měření hloubek, existují také další faktory, které mohou zkreslit (ovlivnit přesnost) výsledky měření hloubek, a to charakter dna, vegetační pokryv, biota a jiné částice ve vodním sloupci (Dierssen et Theberge, 2012).

V současné době se pro měření batymetrie s vysokým rozlišením používají mnohopaprskité (tzv. multi-beam) sonary (obrázek 3.). Jak se zmiňuje Dierssen et Theberge (2012), každý pulz tohoto “multi-beam“ sonaru emituje široký pás zvukových vln (až 153°). Odražené signály ode dna jsou zachytávány řadou přijímačů a následně jsou elektronicky oddělovány do několika samostatných svazků. Z těchto jednotlivých svazků jsou následně vypočteny příslušné hloubky. U mělkých vod je dosaženo vysokého rozlišení ovšem na úkor prostorového rozsahu měření. Naopak u velkých hloubek je prostorový rozsah sonaru velký, ale s tím negativem, že klesá rozlišení výsledných dat. Nicméně i při větších hloubkách je

možné získat data s poměrně velkým rozlišením, a to hlavně díky použití různých frekvencí vysílaných pulzů. Postup mapování dna by se dal přirovnat k postupu při sekání trávy. Loď jezdí v souběžných pruzích a provádí mapování a zobrazování dna. Ze souboru překrývajících se pruhů se následně sestavují batymetrické mapy. Tento postup se používá zejména u mapování mořského dna. Pro různé rozsahy hloubek se používají různé zvukové frekvence (např. 12-400 kHz), (Poppe et Polloni, 1998). Pro měření hlubších oblastí se používají nižší frekvence, zatímco vyšší frekvence se používají pro menší hloubky, ovšem při větším rozlišení. V současné době lze batymetrii měřit s rozlišením a přesností, kterých nebylo dříve možné dosáhnout (Moline et al, 2007). Hlavní nevýhodou této metody měření je časová náročnost a vysoké náklady spojené s měřením (Dierssen et Theberge, 2012).



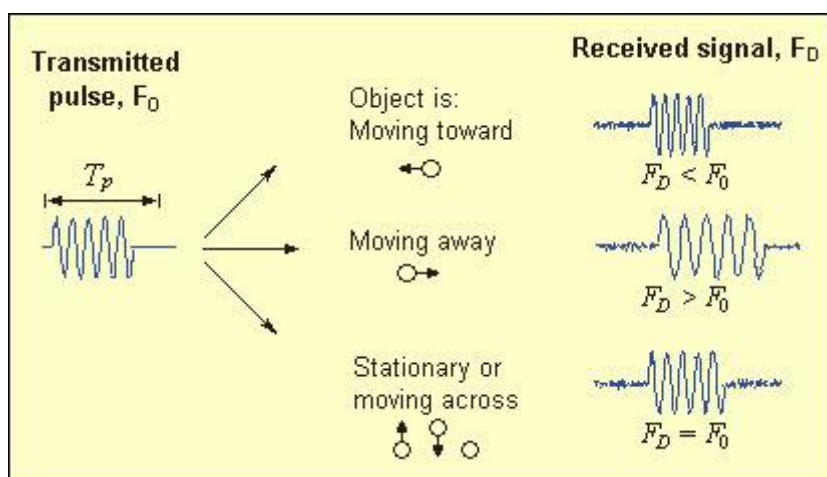
Obrázek 3: Porovnání jedno a více paprskových sonarů (Dierssen et Theberge, 2011)

3.3.1. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Jedním způsobem převedení akustických metod měření batymetrie do praxe je přístroj ve zkratce nazývaný ADCP, neboli Acoustic Doppler Current Profiler, nebo také Acoustic Doppler Profiler. Tento přístroj se používá k měření rychlosti proudění vody v rámci celého vodního sloupce, je však použitelný i k měření hloubek, tedy batymetrie. Tento přístroj se dá použít v různých konfiguracích, například namontován na plavidle, či pevně ukotven na dně nádrže či toku, nebo také pevně připevněn na pilíři mostní konstrukce, kde provádí kontinuální měření. ADCP pevně

ukotveno na dně toku či nádrže je schopno měřit aktuální rychlosti, a to nejen ve spodní části profilu, ale také ve stejných intervalech vodního sloupce až k hladině. Přístroj namontovaný horizontálně na mostní pilíř v řekách či kanálech je schopen měřit aktuální profil od břehu ke břehu v reálném čase. U velmi hlubokých oblastí může být přístroj spouštěn na kabelu z hladiny (Jourdin et al., 2014).

ADCP měří vodní proudy pomocí akustických metod za použití principu zvukových vln zvaných Dopplerův jev. Tento jev je založen na faktu, že zvuková vlna má vyšší frekvenci nebo výšku, když se pohybuje směrem k pozorovateli, než když se pohybuje směrem od pozorovatele. V běžném životě se s Dopplerovým jevem lze setkat, například když kolem vás projíždí auto se sirénou. Tón sirény se jeví pozorovateli vyšší vůči skutečné výšce, když se k němu auto přibližuje, a naopak když se siréna vzdaluje, jeví se tón jako nižší, než ve skutečnosti (Dierssen et Theberge, 2011).



Obrázek 4: Princip Dopplerova jevu (Dierssen et Theberge, 2011)

ADCP pracuje tak, že vysílá zvukový pulz, tzv. “PING“, o konstantní frekvenci do vody. Používané zvukové pulzy mají tak velkou frekvenci, že jsou pro člověka či například pro delfina neslyšitelné. Zvukové vlny vysílané přístrojem se odrážejí od suspendovaných látek ve vodě, v případě batymetrie ode dna, a jsou odrazeny zpět do přístroje. Díky Dopplerovu efektu se zvukové vlny vysílané přístrojem vrací do přístroje s mírně nižší frekvencí, když se odrážejí od částic, které se pohybují směrem od přístroje. Zvukové vlny odražené od částic pohybujících se směrem k přístroji se vrací s mírně vyšší frekvencí (obrázek 4). Rozdíl mezi frekvencemi vln, které přístroj vysílá, a frekvencemi vln, které se k němu vrací, se

nazývá Dopplerův posun (Jourdin et al., 2014). Tento posun následně přístroj používá k výpočtu rychlosti částic ve vodě, respektive k výpočtu rychlosti vody. Zvukovým vlnám, které se odrážejí od částic, které se nacházejí dále od přístroje, trvá delší dobu, než se vrátí, než vlnám odraženým od částic blíže k přístroji. Měřením času, potřebného k odrazu zvukové vlny zpět a Dopplerova posunu může přístroj měřit aktuální rychlost vody v různých hloubkách s každou sérií zvukových vln, které vysílá (Dierssen et Theberge, 2012).

Výhody použití:

V minulosti bylo nutné k měření rychlosti proudění použít absolutních způsobů měření, např. hydrometrování. Tento fakt vedl k určitým omezením měření, a to zejména k omezení velikosti měřeného prostoru, resp. toku, nemluvě o nutnosti následného výpočtu požadovaných veličin. Na rozdíl od těchto dříve používaných způsobů, ADCP měří absolutní rychlost vody v reálném čase. To znamená, že neměří pouze to, jak se pohybuje jedna masa vody ve vztahu k jiné (WHOI, 2010).

Nevýhody použití:

Z vysokofrekvenčních zvukových vln lze získat přesnější údaje, naopak nízké frekvence na jednu stranu dokáží cestovat vodou na delší vzdálenost, ovšem při zmenšené přesnosti měření. Je tedy nutné stanovit kompromis mezi prostorovou náročností měření a jeho přesností. V případě měření prováděného v rámci této práce je tato nevýhoda kompenzována multi-beam paprskem. Další nevýhodou je, že v případě měření ve velmi čisté vodě není dostatek částic, od kterých se mohou zvukové vlny odrážet a přístroj proto neudává relevantní data (WHOI, 2010).

3.4. Optické metody

K měření batymetrie mělkých vod se používá dálkový průzkum viditelným světlem. Používá se tam, kde jsou akustické metody, například díky velikosti zkoumané plochy či časové nebo finanční náročnosti, limitovány. Optické metody měření batymetrie lze rozdělit na pasivní metody, tedy metody, které měří přirozené světlo odrážející se ode dna, a aktivní metody, které používají k měření batymetrie lasery (Dierssen et Theberge, 2011).

3.4.1. Pasivní metoda (passive ocean color remote sensing)

Tato metoda je založena především na měření odrazejícího se slunečního světla. Ze slunečního světla, které dopadá na hladinu, je pouze malé procento odraženo a rozptýleno zpět. Tato metoda měří právě toto malé procento odraženého rozptýleného slunečního záření, které vstupuje do vodního sloupce (Dierssen, 2010). Ve vodách, které jsou mělké a dostatečně čisté, aby světlo mohlo proniknout až na dno (tzv. opticky mělké), hraje roli i barva dna, která přispívá k množství odraženého záření, na jehož základě lze následně odvodit kompozici dna, přeneseně tedy batymetrii. V nejčistších přírodních vodách lze detekovat písčité dno až do hloubky 30 m a více. Ve většině oblastí je ovšem jasnost vody snížena o přítomnost řas, sedimentů a jiných barevných látek, a obecně tedy mohou být měřeny hloubky do deseti metrů, spíše menší. Z těchto důvodů, tedy zakalenosti vody sedimentem a těžkým fytoplanktonem, je velké procento světla vstupujícího do vodního sloupce absorbováno v horních vrstvách vodního sloupce a voda se stává tzv. "opticky hluboká". V tomto případě je měření omezeno pouze na několik metrů hloubky. V dostatečně mělké a čisté vodě je magnituda a spektrální kvalita odraženého světla kvalitní do té míry, že je možné je interpretovat za pomoci dálkových snímačů barev. Metody k získání batymetrie na základě této metody mohou být měřeny empiricky (Lyzenga, 1978) nebo radiometricky za použití iterativního modelování nebo tak zvaných "look-up" tabulek. Look-up tabulka je postup, kdy se jednotlivým barvám při 2D vizualizaci určují hodnoty podle daného předpisu (Dekker et al, 2011).

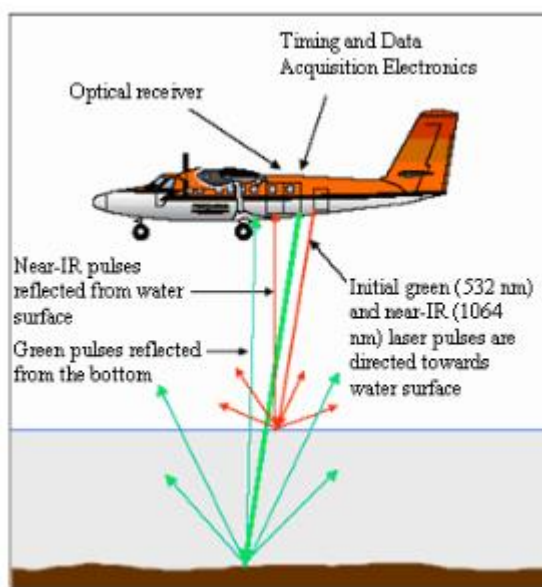
Obecně tedy o této metodě lze konstatovat, že hloubky jsou odhadovány na základě snímků odraženého světla, kde se jednotlivým barevným odstínům na snímku přiřazuje nějaká hodnota, v našem případě hloubka. Většina empirických přístupů používá vysoce červené záření nebo záření blízké infračervenému pro určování batymetrie, a to hlavně v těch oblastech, kde voda záření do velké míry absorbuje a signál je méně ovlivněn fytoplanktonem, sedimenty a dalšími faktory, které ovlivňují rozptyl a odraz světla ve vodním sloupci. Radiometrické metody používají pro měření obecně povětšinou viditelné spektrum a pro měření vyžadují velké množství vlnových délek, tedy dat k získání batymetrie. Kromě toho radiometrické metody jsou závislé na barevném složení dna, které je klíčovým komponentem pro kvalitu radiačního záření opouštějícího vodu. Tato metoda měření batymetrie již byla použita v minulosti na měření batymetrie o velkém prostorovém rozlišení za pomoci letadel a satelitů na regionální úrovni. Na základě těchto principů

v současnosti pracují barevné senzory na satelitních družicích a probíhá zde oceánografický výzkum odvození batymetrie mělkých vod za použití těchto senzorů. Tento způsob je velmi efektivní a co do nákladů levnější, než akustické metody. Nicméně i v této metodě jsou limitující faktory, které měření zkreslují nebo znemožňují. Jedním z hlavních jsou oblaka, která mohou zakrývat “výhled“ satelitních čidel a tudíž znemožnit měření. Dalším problémem je fakt, že světlo prochází při cestě k hladině silnou vrstvou atmosféry, která obsahuje plyny a aerosoly, které také odrážejí záření. Atmosféra sama o sobě odráží do senzorů více fotonů než samotné vodní plochy, a z tohoto důvodu musí docházet k přesným atmosférickým korekcím, aby bylo možné získat pouze záření odražené vodní plochou tedy záření, které se využívá k odhadu batymetrie mělkých vod. Pokud je atmosférickou korekcí odstraněno příliš velké množství signálu, tak se vodní plocha na snímku jeví jako příliš tmavá a odhad batymetrie tím může být zkreslen, čili nadhodnocen či podhodnocen (Dierssen et Theberge, 2011).

3.4.2. Aktivní metoda - LIDAR Batymetrie

LIDAR, neboli “Light Detection And Ranging“, je dalším způsobem, jakým lze měřit batymetrická data. Tento systém se používá namontován na letadle. K tomu, aby byl schopný tento systém fungovat, je zapotřebí vysokofrekvenční laser, GPS přijímač a IMU (inertial measurement unit), neboli inerciální měřicí jednotka (Quadros et Collier, 2008). Laser zahrnuje emitující diodu, která produkuje světelný zdroj o specifické frekvenci. Tento systém je schopen zaznamenat časový rozdíl mezi vysláním laserového pulsu a příjmem odražené zpětného signálu (tzv. “dobu letu“). Znalost rychlosti přenosu a “doby letu“ umožňuje vypočítat vzdálenost mezi laserovým vysílačem a povrchem, od kterého se laser odráží (terénem). GPS a IMU zařízení se používají k určení prostorové pozice letadla a orientaci laserového skeneru v každé měřicí epoše. Uvnitř laserového vysílače je umístěno rotační zrcadlo, které rozptyluje laserové světlo kolmo ke směru letu. Obrácením směru rotace zrcadla o vybraný úhlový interval mohou být laserové impulsy uzpůsobeny pro skenování zpět a vpřed během letu. Rozlišení systému je určeno kombinací skenovacího úhlu a výškou letadla. To znamená, že čím větší výška, tím širší skenovaná oblast, ale horší rozlišení. LIDAR pro batymetrická měření používá dva typy laserů o rozdílných vlnových délkách. Dva typy laserů se používají, proto, že dno musí být měřeno odděleně od povrchu hladiny. Červený laser o vlnové délce

1064 nm se používá k detekování povrchu vody a zelený laser o vlnové délce 532 nm k detekování dna (Wozencraft et Millar, 2005). Toto je schematizováno na obrázku 5. Vlnová délka zeleného laseru je optimální k průniku vody a tedy měření hloubky vody. Červený laser se používá k určení výšky letadla nad hladinou vody. Hloubka vody se následně vypočítá z časové diference mezi návratem obou signálů po odrazu. Jak zelený laser prochází vodním sloupcem a odráží se od dna, absorbuje se, rozptyluje a láme. Tyto procesy omezují návratovou energii laseru, což limituje hloubku vody, která může být měřena. Maximální hloubka měření je ovlivněna interakcí zákalu vody a úhlem a intenzitou slunečního záření. Průměrná maximální hloubka měření je asi 30-40 m. Toto omezení hloubky znamená, že batymetrický LIDAR nemůže nahradit konvenční způsoby měření hloubek (Danson, 2006).

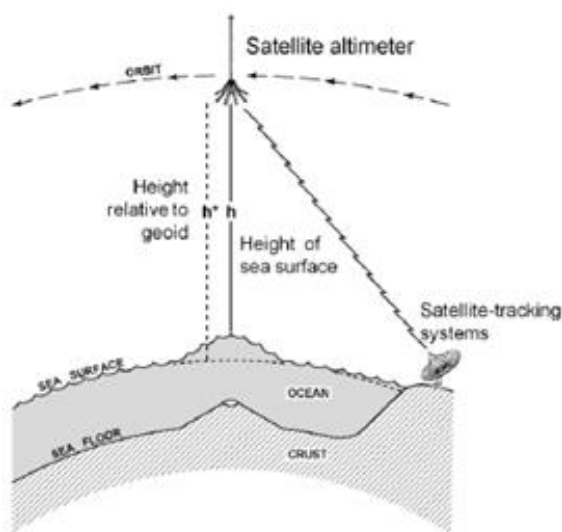


Obrázek 5: Princip metody LIDAR (LaRocque et West, 1990)

3.5. Radarové metody

Radarové měření batymetrie, nebo také satelitní měření výšek, je metoda založena na použití vesmírných radarových senzorů a odhadování batymetrie z teorie vln. Použití této metody je hlavně pro velké plochy, jako jsou oceány a moře. Metoda není přímo schopná snímat dno oceánů jako například optické metody. Mapování batymetrie z vesmíru (tzv. space-based) je možné díky faktu, že topografie dna vytváří gravitační anomálie, které korespondují s výkyvy ve výšce povrchu vodní hladiny, které je touto metodou měřitelné. Hladina je vyboulená mírně nahoru v reakci na podmořské útvary. Radarové výškoměry mohou měřit tyto drobné změny

ve výškách hladiny vysíláním impulzů radiových vln o vysokých frekvencích. Tyto frekvence se obvykle pohybují v rozsahu 13 GHz (Smith & Sandwell, 2004). Tyto pulzy se odrážejí od hladiny, přičemž je měřen čas, za který se signál vrátí zpět do senzoru. Pokud je pozice satelitů dobře určena, pak z doby pulzu lze poměrně přesně odhadnout výšku hladiny vzhledem k senzoru, a to v řádu několika centimetrů. Na vlnových délkách 1- 200 km spolu gravitační anomálie a topografie dna do vysoké míry korelují a mohou být použity pro mapy gravimetrické batymetrie o rozlišení 10 km. Pole gravitačních anomálií na hladině se určuje pomocí matematických rovnic (Laplaceova diferenciální rovnice), která umožňuje odvodit anomálie v magnitudě gravitace, jednoduše řečeno gravitační anomálie z výchylek od svislice (Haxby et al., 1983; Sandwell, 1984). To vše je užitečné, protože gravitační anomálie jsou snadněji interpretovatelné a korelované se strukturami na dně, a také protože mohou být porovnány s nezávislými měřeními, které provedly loďní gravimetrické systémy (obr. 6). Jednoduše řečeno, jeden microradian vertikální výchylky může souviset s 1 milliGal (jednotka zrychlení v gravimetrii) anomálií v gravitačním zrychlení (Smith & Sandwell, 2004).



Obrázek 6: Princip satelitního měření výšek (Dierssen et Theberge, 2011)

4. Přehled interpolačních metod bodových dat

4.1. Interpolace

Interpolace je proces, který pomocí matematických funkcí vypočítává neznámé hodnoty na základě hodnot známých. V největší míře je interpolace využívána k výpočtu výškových souřadnic neznámého bodu (Klimánek, 2006). Příkladem použití může být interpolace vrstevnic na základě okolních známých vrstevnic (Doušek et Matějčík, 2005).

Interpolačních metod existuje několik typů, přičemž každá z těchto metod při použití stejných vstupních dat generuje rozdílné výsledky (Šimonides, 2006).

Ve své podstatě se interpolační metody dají rozdělit do dvou skupin. Na metody exaktní a metody aproximační. To, co rozděluje interpolační metody do těchto skupin je fakt, zda metoda při interpolaci ponechává či neponechává původní hodnoty. Jinými slovy hodnota, kterou má bod před interpolací je stejná hodnota, jakou má stejný bod v interpolovaném povrchu. Metody, které zachovávají původní hodnotu jsou exaktní a metody, které ji nezachovávají, jsou aproximační. Nicméně interpolační metody se dají rozdělit do skupin podle více kritérií (Horák, 2002).

V této práci je použito rozdělení na metody deterministické a metody stochastické. Podle čeho se dělí interpolační skupiny do těchto dvou kategorií je popsáno v následujících odstavcích.

4.2. Deterministické interpolační metody

Do kategorie deterministických interpolačních metod lze zařadit ty metody, které používají k výpočtu neznámých hodnot matematické funkce. Tyto metody pracují buď na principu stupně podobnosti (IDW), anebo na stupni vyhlazení (SPLINE) měřených sousedních veličin (Bergouse et Reis, 2015).

4.2.1. Thiessenovy polygony

Thiessenovy polygony, jinak také známy jako Voroného polygony nebo Voroného diagramy, jsou základní metodou pro analýzu "blízkosti" a "sousedství". Thiessenovy polygony se používají pro přidělení prostoru k nejbližšímu bodu funkce. Definují oblast kolem bodu, ve které je každé místo blíže k tomuto bodu než všechny

ostatní místa (ve 2D). Tento postup může být použit i u více dimenzí a v tomto případě se nazývají Thiessenův mnohostěn nebo také Voroného mnohostěn (Kumler, 1990).

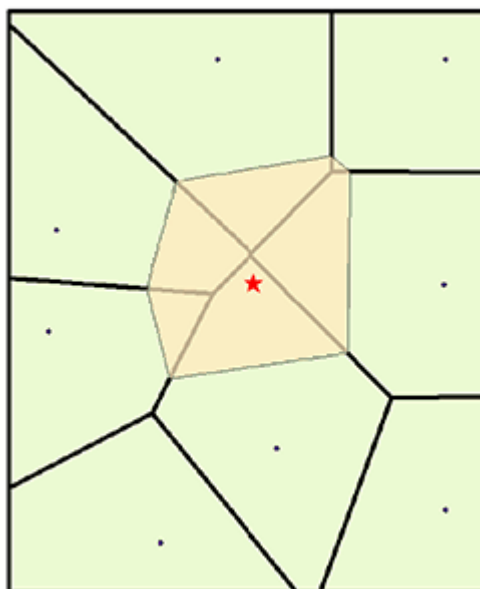
Pro použití Thiessenových polygonů existuje mnoho aplikací. Thiessenovy polygony jsou díky jejich organizaci podobné mnoha jevům, které pozorujeme v přírodě a v geovědách. Kumler (1990) udává následující příklad: Thiessenovy polygony jsou použity pro generování mapy půdy, založené na nepravidelně distribuovaných bodech odběru vzorků. V polovině vzdálenosti mezi body odběru vzorků se předpokládá hranice mezi typy půd z jednotlivých vzorků. Zároveň se předpokládá, že neexistují jiné informace o zkoumané oblasti (Kumler, 1990).

Thiessenovy polygony se sestavují za použití geometrického přístupu. Jak již bylo řečeno, tyto polygony obklopují prostor, který je blíže k hledanému bodu, než kterékoli jiné místo v oblasti. Je tedy zřejmé, že hranice Thiessenových polygonů jsou místa, které mají geometricky stejnou vzdálenost od dvou u sebe ležících středů. Za účelem stanovení Thiessenových polygonů jsou ze všech bodů vytvořeny trojúhelníky do nepravidelné trojúhelníkové sítě. Pro každou hranu trojúhelníku jsou generovány kolmé přímky přesně ve středu hrany. Tyto kolmé křivky vytvářejí okraje Thiessenových polygonů (Panigrahy et al., 2009).

4.2.2. NATURAL NEIGHBOUR (metoda přirozeného souseda)

Metoda přirozeného souseda interpoluje hodnoty tak, že najde nejbližší podmnožinu vstupních vzorků k hledanému bodu a dává jim váhu založenou na dílčích oblastech (Sibson, 1981). Jinak řečeno, tato metoda využívá Thiessenovy polygony pro stanovení vah. Metoda je také známa jako "Sibson interpolace" nebo též metoda "kradených oblastí". Základní vlastností metody je, že je lokální, což znamená, že používá pouze podmnožinu bodů, které obklopují hledaný bod, přičemž u interpolovaných výšek je zaručeno, že se pohybují v mezích vstupujících bodů. Metoda nevyvozuje trendy a ve výsledcích neprodukuje vrcholy, jámy, hřebeny, nebo údolí, které nejsou zastoupeny ve vstupních vzorcích. Povrch prochází do výpočtu vstupujícími vzorky a je "hladký" všude kromě míst vstupujících vzorků. Breaklines, neboli linie které výrazně přerušují sklon povrchu, mohou být použity k rastrové interpolaci, a to ke zvýšení povrchu, vytvářejíc lineární nespojitosti například podél silnic a vodních ploch. Adaptují se lokálně struktuře vstupních dat

a nevyžadují vstupy od uživatele spočívající v hledaném rádiu, počtu vzorků, nebo tvaru. Vše funguje stejně dobře s pravidelně i nepravidelně distribuovanými daty (Watson, 1992).



Obrázek 7: Princip metody Natural Neighbor (ESRI, 2008)

Jak ukazuje obrázek 7, přirození sousedé každého bodu jsou ti, kteří sousedí s Thiessenovými polygony. Na počátku je Thiessenův diagram konstruován ze všech daných bodů, reprezentovaných olivově zbarvenými polygony. Nový Thiessenův polygon (běžová barva) je následně vytvořen okolo interpolovaného bodu (červená hvězda). Podíl překrytí mezi tímto novým polygonem a počátečními polygony je použit jako váha (ESRI, 2008).

4.2.3. IDW

IDW, neboli metoda inverzní vzdálenosti, pracuje na geostatickém principu, že jevy jsou si v prostoru podobné tím víc, čím blíže v prostoru jsou od sebe vzdáleny. Na základě tohoto principu se určují váhy jednotlivých vstupních bodů. To znamená, že vstupující body, které jsou prostorově blíže bodu, který počítáme, mají větší váhu pro výpočet než body více vzdálené. Vše je tedy založeno na použití inverzní vzdálenosti od určitého bodu. K úpravě této vzdálenosti je dále používán exponent p . Z konstatovaných skutečností lze vyvodit fakt, že váhy se řídí jediným prostorovým

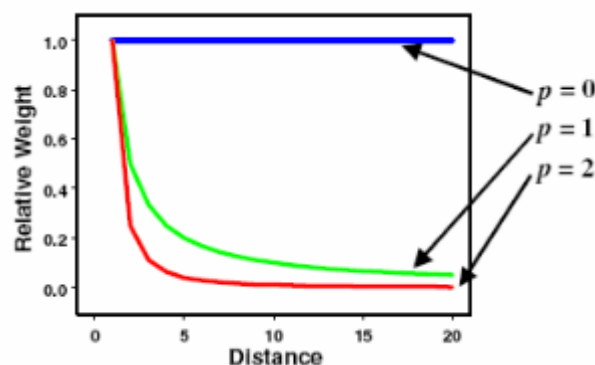
modelem, tedy inverzní vzdáleností, která je modifikována vhodnou mocninou. Vše vyjadřuje rovnice (1), (Childs, 2004).

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{d_{i,0}^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,0}^p}} \quad (1)$$

Kde:

- $d_{i,0}$ je rovno vzdálenosti známého a interpolovaného bodu
- p je volený údaj od 1 do 3

Parametr p přiřazuje měřeným bodům tím podobnější váhy, čím menší má hodnotu. To znamená, že čím je parametr p nižší, tím více se výsledný odhad bude blížit aritmetickému průměru. V případě, že by parametr p byl roven nule, interpolovaný bod bude roven aritmetickému průměru. Toto znamená, že bez ohledu na prostorové rozmístění měřených bodů, budou přiřazované váhy stejné pro všechny body. Při vyšší hodnotě p budou váhy přidělené bodům rozdílné. Body více vzdálené dostanou nižší váhu a body méně vzdálené vyšší váhu. Nejčastější hodnota parametru p , která se používá, je 2 (Burrough et McDonnell, 1998).



Obrázek 8: Změna váhy bodu se změnou vzdálenosti u rozdílných parametrů p (ESRI, 2007).

Slabinou metody IDW je, že okolo bodů, které vstupují do výpočtu, vytváří koncentrické izolinie, v angličtině též “bull eyes“. Při vyšší hodnotě exponentu mají body velký vliv na své okolí, což je důvod této slabiny. Aby bylo možné, tento vliv

zmírnit, musí být metoda změněna z exaktní na aproximující. Toto se děje zavedením vyhlazovacího parametru σ , jak ukazuje rovnice (2), (Johnston et al., 2001).

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{(d_{i,0} + \sigma)^y}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{(d_{i,0} + \sigma)^y}} \quad (2)$$

Jistou nevýhodou této metody je fakt, že nedokáže vypočítat hodnoty nižší nebo vyšší, než hodnoty vstupních dat. Nedokáže extrapolovat. Díky této skutečnosti dochází na místech, kde nejsou v měřených bodech zaznamenány extrémní hodnoty, ke zkreslení výsledných interpolovaných dat (ESRI, 2007).

4.2.4. SPLINE

Metoda spline pracuje na principu matematických funkcí, za pomoci kterých odhaduje neznámé hodnoty. Princip metody spočívá ve dvou podmínkách, které musí být splněny. První podmínkou je fakt, že matematická funkce, kterou prokládáme zkoumanou oblast, prochází měřenými body. Druhou podmínkou je, že prokládaná matematická funkce má minimální křivost. Tato metoda ve své podstatě napodobuje nějaký tenký flexibilní povrch, který si lze představit jako tenký plát plechu či list papíru. Tento útvar prochází přesnými naměřenými body (tzn. je exaktní) a musí být co nejhladší, tedy musí mít nejmenší zakřivení, které je možné (Elonen, 2005).

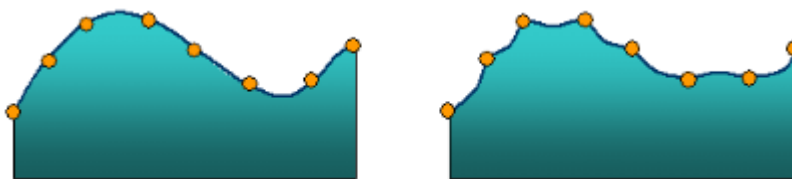
Povrch je reprodukován řadou polynomických funkcí, kdy jednotlivé části povrchu mají vlastní samostatnou polynomickou funkci. Tyto funkce jsou odvozeny z lokálních hodnot a podmínkou je, že na styku jednotlivých polynomických funkcí musí být zajištěna spojitost (u kubických polynomických funkcí je požadována shoda prvních dvou derivací). Efektem tohoto je povrch, který respektuje body, které do výpočtu vstupují, a zároveň je hladký (Bookstein, 1989).

$$S(s) = T(s) + \sum_{i=1}^n \lambda_i R(r_i) \quad (3)$$

Kde:

- $T(s)$ vyjadřuje polynomicickou funkci
- λ_i vyjadřuje neznámé koeficienty známých bodů
- $R(r_i)$ vyjadřuje základní radiální funkci, která závisí na vzdálenosti r_i
- r_i vyjadřuje vzdálenost bodu $s = f(x,y)$ a i -tého měřeného bodu
- N vyjadřuje množství měřených bodů

Oproti metodě IDW dokáže metoda spline určit hodnoty vyšší i hodnoty nižší, než jsou hodnoty vstupující do výpočtu. Na obrázku 9 je zobrazeno porovnání těchto dvou metod v příčném řezu. V řezu spline je vidět podmínka co nejhladších interpolovaných míst. U IDW je vidět závislost na vážených průměrech jednotlivých bodů (Childs, 2004).



Obrázek 9: Porovnání IDW (vpravo) a SPLINE (ESRI, 2007)

4.2.5. Topo To Raster

Metoda Topo to Raster byla vyvinuta pro geografické informační systémy a jedná se o jistou modifikaci metody spline. Topo to raster je speciální interpolační metodou, která je navržena pro vytváření hydrologicky korektních digitálních elevačních modelů (DEM – digital elevation model). Princip této metody je založen na počítačovém programu ANUDEM, který vyvinul Michael Hutchinson (Hutchinson et Dowling, 1991).

Metoda Topo to Raster, stejně jako ostatní metody, interpoluje povrch z výškových hodnot. Oproti ostatním metodám však ukládá omezující podmínky vytváření interpolovaného povrchu. Tyto omezující podmínky zajišťují:

- *Propojení odtokové struktury*
- *Správnou reprezentaci hřebenů a vodních toků*

Do výpočtu kromě bodové vrstvy výškových souřadnic vstupují, na rozdíl od jiných metod, také liniové vrstvy, které reprezentují obrysy (hlavní linie) vodních toků či hřebenů (Hutchinson et Dowling, 1996).

Postup interpolace u této metody je navržen tak, aby využíval takové typy vstupních dat, které jsou lehce dostupná a jsou u nich známy sklonové charakteristiky povrchu (charakteristiky výškových ploch). Tato metoda využívá iterativní konečnou diferenční interpolační techniku. Metoda Topo to raster je navržena tak, aby její výpočetní účinnost dosahovala lokálních interpolačních metod, jako je například IDW, ale zároveň je navržena tak, aby při výpočtu nedocházelo ke ztrátě kontinuity povrchu, jako tomu bývá u globálních interpolačních metod, jako jsou Kriging či SPLINE. Jak píše Wahba (1990) je to v podstatě diskretizovaná metoda SPLINE, ovšem s tím rozdílem, že výsledný interpolovaný povrch na základě vstupních dat může reprezentovat ostré změny terénu, jako jsou hřebeny či vodní toky.

Jednoduše lze říci, že Topo to Raster využívá znalosti povrchu a klade omezení pro interpolovaný povrch, která reprezentují odvodňovací struktury a správné zastoupení hřebenů a vodních toků (Hutchinson and Gallant, 2000).

Do výpočtu Topo to Raster mohou vstupovat tyto typy dat:

- *Výškové body – body s informací o nadmořské výšce*
- *Obrysy – linie o známé nadmořské výšce*
- *Toky – linie, které reprezentují vodní toky. U této vrstvy je důležitá orientace vektorů liniové vrstvy. Vektory musí být ve směru toku vody (tzn. shora dolů)*
- *Deprese – jedná se o bodovou vrstvu, která reprezentuje deprese povrchu*
- *Vodní plochy – vrstva, která pomocí polygonů reprezentuje vodní plochy, což znamená, že všem hodnotám v polygonu, který reprezentuje vodní plochu, přidělí nejnižší výškovou hodnotu v okolí břehové hrany (okraje polygonu), (Kočický, 2007).*

4.3. Stochastické metody interpolace

Stochastické metody interpolace, oproti deterministickým, používají pro výpočet neznámých hodnot kromě matematických funkcí také funkce statistické. Tyto metody používají prostorovou autokorelaci mezi body, které vstupují do výpočtu, a následně umožňují na základě pravděpodobnosti odhadnout kvalitu interpolace (Bergouse et Reis, 2015).

4.3.1. KRIGING

Kriging je pokročilou geostatickou metodou, která odhaduje povrch ze souboru rozptýlených bodů, u kterých je známá hodnota výšky.

Interpolační metody IDW a SPLINE patří mezi deterministické metody interpolace, protože jsou založeny na okolních naměřených hodnotách, nebo na určitém matematickém vztahu, který určuje výslednou podobu interpolovaného povrchu. Oproti tomu interpolační metody, do kterých lze zařadit kriging, patří mezi stochastické metody. Tyto metody jsou založeny na statistických modelech, které obsahují autokorelaci, což znamená, že mezi body existují statistické vztahy. Díky těmto skutečnostem jsou stochastické metody schopny nejen interpolovat povrch, ale také zajistit určitou míru jistoty a přesnosti interpolace (Burian, 2008).

Metoda kriging předpokládá, že vzdálenost nebo vzájemná poloha měřených bodů reflektuje prostorovou korelaci, která se používá k určování variací povrchu. Kriging prokládá matematickou funkci určitým počtem bodů nebo všemi body v předem daném okruhu a následně určuje výstupní hodnoty všech hledaných míst. Kriging je několikastupňový proces, který zahrnuje statistické analýzy měřených dat, modelování tzv. variogramu, tvorbu povrchu a dokáže také zjistit variabilitu povrchu. Je vhodné ho použít v případech kdy je známo, že u měřených dat existuje prostorová autokorelace vzdálenosti mezi body nebo prostorová (směrová) závislost mezi body (Burrough, 1986).

Kriging podobně jako metoda IDW přiděluje jednotlivým bodům váhy na jejichž základě následně interpoluje povrch. Obecnou rovnicí pro tyto dvě interpolační metody lze formulovat jako vážený průměr vstupních dat. Vzorec lze vyjádřit takto (Kraus, 2007):

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (4)$$

Kde:

- $Z(s_i)$ = naměřená hodnota i -té oblasti
- λ_i = Neznámá váha naměřené hodnoty i -té oblasti
- S_0 = předpovídaná oblast
- N = počet naměřených hodnot

U IDW závisí váha (λ_i) měřených bodů pouze na vzdálenosti od interpolovaného bodu. Oproti tomu u krigingu váhy jednotlivých vstupních bodů nezáleží pouze na vzdálenosti známých bodů od interpolovaného, ale také na celkové prostorové uspořádanosti měřených bodů. Proto, aby bylo možné prostorové uspořádání bodů zahrnout do určení váhy, musí být kvantifikována prostorová autokorelace. U běžného krigingu závisí váhy jednotlivých bodů na dobře zvoleném rozložení měřených bodů, vzdálenosti interpolovaného bodu od naměřených, a na prostorových vztazích mezi naměřenými body kolem interpolovaného místa (Heine, 1986). V následujících odstavcích je popsáno jak je obecný kriging používán k interpolaci povrchu a ke zjištění přesnosti interpolace

Pro interpolaci metodou kriging jsou potřebné dva parametry. Prvním parametrem je získání pravidel vzájemné závislosti bodů a druhým je vytvoření interpolace (odhadu). Tyto dva parametry získává kriging dvěma za sebou jdoucími kroky. Prvním krokem je vytvoření variogramu a druhým vytvoření kovariační funkce k odhadu statistické závislosti (prostorové autokorelace) hodnot, které jsou závislé na modelu autokorelace. Výstupem z těchto dvou kroků je odhad interpolace. Z těchto dvou odlišných kroků využívá kriging údaje dvakrát. Poprvé odhadne prostorovou autokorelaci dat a podruhé vytvoří interpolovaný povrch (predikci), (Oliver, 1990).

Hledání správného modelu nebo také prostorové modelování, je také známo jako strukturální analýza nebo variograf. V prostorovém modelování struktury měřených bodů se začíná s grafem empirického semivariogramu, který lze vypočítat

pomocí vzorce, a to pro všechny dvojice míst vzdálených o úsek h (McBratne at Webster, 1986):

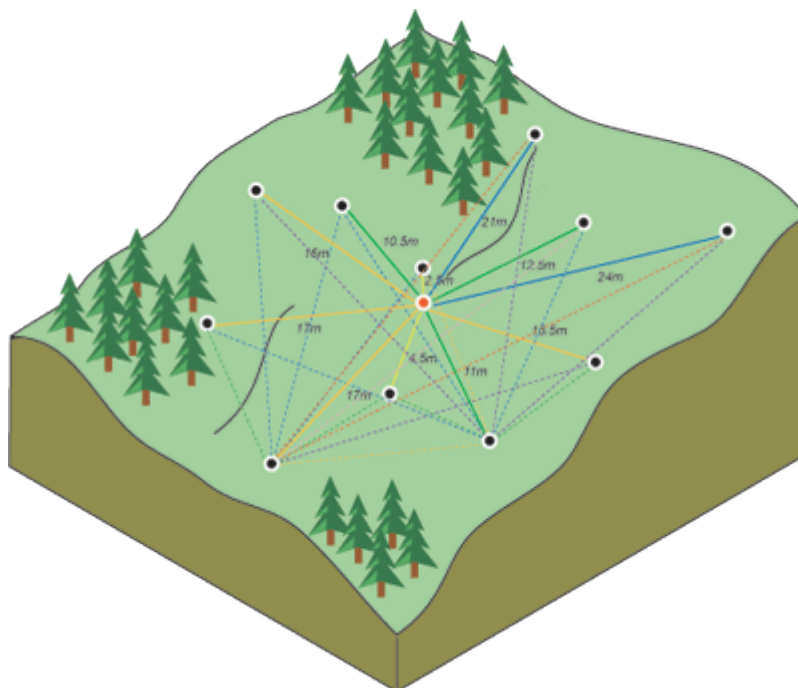
$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(s_i) - z(s_i + h)]^2 \quad (5)$$

Kde:

- $\gamma(h)$ je odhadovaná semivariance pro vzdálenost h
- $n(h)$ je počet všech párů měřených bodů oddělených vzdáleností h
- $z(x)$ je měřená hodnota v bodě (x)

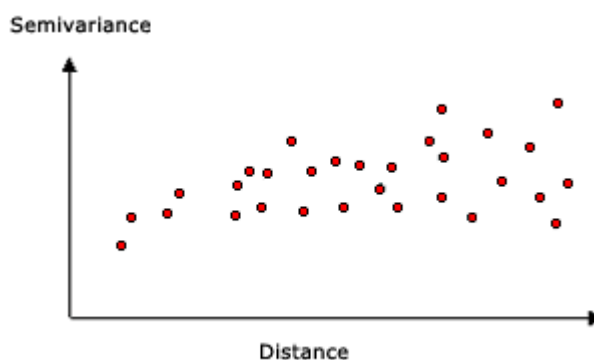
Vzorec vyjadřuje výpočet rozdílu čtverců mezi hodnotami vzájemně propojených míst (McBratne at Webster, 1986).

Obrázek 10 ukazuje vzájemné propojení jednoho bodu (červený bod) s ostatními měřenými body. Toto propojení se v průběhu výpočtu opakuje pro všechny měřené body (AGRC, 2011).



Obrázek 10: Propojení dvojic bodů (AGRC, 2011)

Ve většině případů má každý pár bodů svou unikátní vzájemnou vzdálenost, přičemž se jedná o velmi mnoho párů bodů. Následné vykreslení všech dvojic bodů, pokud ho chceme provést v rozumném časovém úseku, je prakticky nemožné. Proto se místo toho, aby se vykresloval každý pár bodů zvlášť, seskupují páry do košů (tzv. bins). Příkladem budiž výpočet průměrné semivariace pro všechny dvojice bodů, které jsou od sebe ve větší vzdálenosti než 40 m, ale zároveň menší než 50 m. Empirický semivariogram je grafem průměrných hodnot semivariogramu na ose y a vzdálenosti na ose x (obr. 11), (Oliver, 1990).

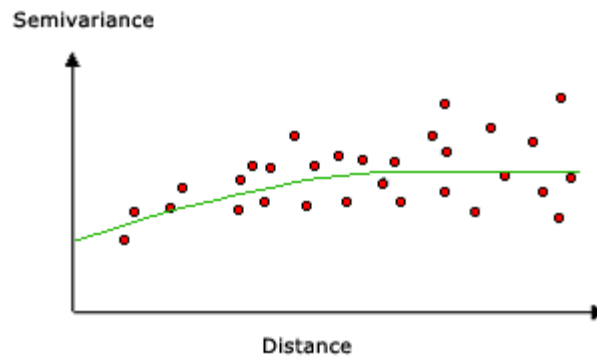


Obrázek 11: Empirický semivariogram (AGRC, 2011)

Prostorová autokorelace kvantifikuje základní princip geografie: věci, které jsou v prostoru blíže sobě, jsou si více podobné, než věci, které jsou od sebe více vzdálené. Tedy dvojice bodů, které jsou blíže sobě (body na obrázku 11 úplně vlevo na ose x) by měly mít podobnější hodnoty (body na obrázku 11 dole na ose y). Naopak, pokud jsou body od sebe dále, jsou od sebe více odlišné a mají vyšší plošnou odchylku (AGRC, 2011).

Dalším krokem je vytvoření modelu, který tvoří empirický semivariogram. Modelování semivariogramu je klíčovým krokem mezi prostorovým popisem nějakého jevu a prostorovou předpovědí. Hlavní aplikací krigingu je predikce hodnot atributů v nezměřených místech. Empirické semivariogramy poskytují informace o prostorové autokorelaci datových souborů. Nicméně neposkytují informace pro všechny možné směry a vzdálenosti. Z tohoto důvodu a také k zajištění toho, aby předpovědi měly pozitivní odchylky je nutné, aby byl použit správný model (kontinuální funkce nebo křivka) empirického semivariogramu. Přeneseně to lze přirovnat k regresní analýze, ve které kontinuální linie nebo křivka prochází datovými body. K nalezení správného modelu empirického semivariogramu je nutné

vybrat funkci, která slouží jako modelová (pro příklad sférický typ, který má stoupající tendenci a se vzrůstající vzdáleností se vyrovná. Jako na obrázku 12 (Scheer, 1990).



Obrázek 12: Semivariogram (AGRC, 2011)

Jak je vidět na obrázku 12 jsou zde odchylky polohy bodů od křivky. Některé body jsou nad křivkou modelu a některé pod křivkou modelu. Nicméně pokud sečtete vzdálenost jednotlivých bodů nad křivkou a vzdálenost jednotlivých bodů pod ní, obě hodnoty by měly být podobné. Existuje několik modelů semivariogramu, které lze použít (Delicado et al, 2010).

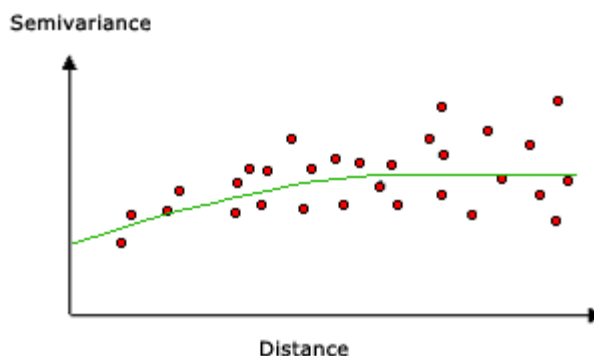
Kriging v ArcGIS poskytuje následující funkce, ze kterých lze vybrat pro modelování empirického semivariogramu (AGRC, 2011):

- Kruhovou
- Sféricou
- Exponenciální
- Gaussovou
- Lineární

Vybraný model ovlivňuje predikci neznámých hodnot, zejména je-li tvar křivky v počátku výrazně odlišný. Je-li na počátku křivka strmější, tak má větší vliv na odhad nejbližších sousedů. Výstupem bude povrch, který je méně hladký. Každý model je navržen na určitý typ zkoumaného jevu. V následujících odstavcích jsou popsány grafy ukazující dva běžné modely a rozebrány rozdíly mezi funkcemi (Press et al.).

Sférický model:

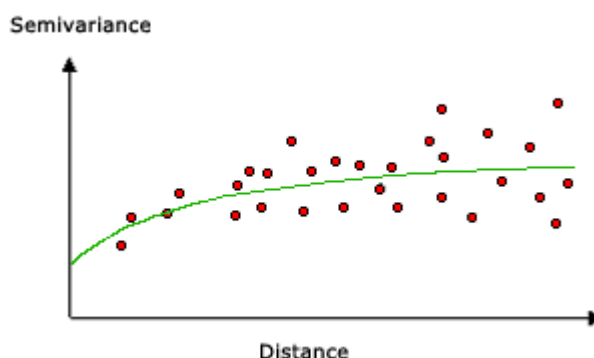
Tento model ukazuje postupné snižování prostorové autokorelace (ekvivalentně nárůst semivariace) až do určité vzdálenosti, za kterou je již autokorelace nulová. Tento model je jeden z nejčastěji používaných (AGRC, 2011).



Obrázek 13: Sférický model simivariogramu (AGRC, 2011)

Exponenciální model:

Tento model je aplikován v případě, kdy prostorová autokorelace klesá exponenciálně se zvětšující se vzdáleností. Autokorelace zde pokračuje do nekonečna. Tento model rovněž patří do běžně používaných modelů. Volba modelu je založena na prostorové autokorelaci dat a na dobré znalosti zkoumaného jevu (AGRC, 2011).

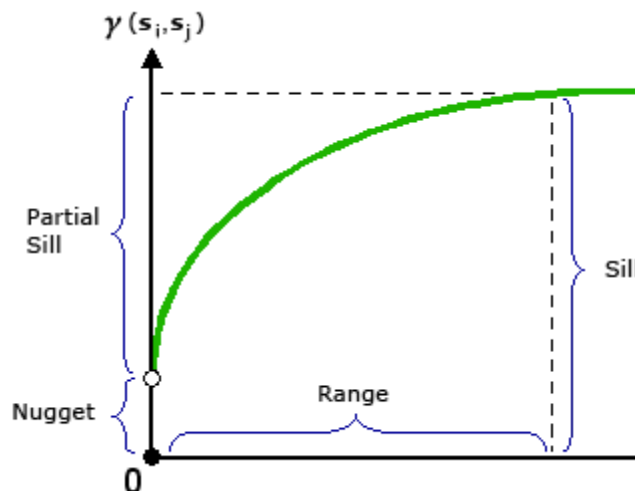


Obrázek 14: Exponenciální model semivariogramu (AGRC, 2011)

Jak již bylo řečeno, semivariogram znázorňuje prostorovou autokorelaci měřených bodů. Vzhledem k základnímu principu geografie (věci bližší sobě jsou si více podobné) měřené body, které jsou k sobě blíže, mají obecně menší prostorový rozdíl, než body dále od sebe. Každý pár bodů je zobrazen po zařazení do koše skrz

tyto body. K popisu těchto modelů se běžně používají termíny rozsah (range), práh (sill) a Nugget (McBratne at Webster, 1986).

Když se podíváme na model semivariogramu (obr. 15) všimneme si, že v určité vzdálenosti se model narovná. Vzdálenost, kde se model poprvé vyrovná, je známa jako rozsah (range). Body, které mezi sebou mají menší vzdálenost než je range, podléhají prostorové autokorelaci (jsou prostorově korelovány). Body vzdálenější než range, jí nepodléhají. Hodnota, při níž model semivariogramu dosáhne hodnoty range (hodnota na ose y) se nazývá sill. Hodnota Nugget je hodnotou počátečního vlivu (Homola, 2004).



Obrázek 15: Model simivariogramu (AGRC, 2011)

Teoreticky, při nulové vzdálenosti mezi body je hodnota semivariogramu také 0. Nicméně pokud je vzdálenost dvou bodů nekonečně malá, semivariogram většinou vykazuje tzv. Nugget efekt, což je hodnota vyšší než 0. Nugget efekt ve své podstatě charakterizuje chybu měření nebo prostorovou zdrojovou odchylku o vzdálenostech menších, než je vzorkovací interval. Chyba měření vzniká v důsledku chyby vlastního měřicího zařízení. To ve výsledku znamená, že je-li prováděno opakované měření bodů na stejném místě, výsledky jsou rozdílné (Mccoy at al., 2001).

Kriging je jednou z nejsložitějších metod co do výpočtu. Model semivariogramu, u kterého je hodnota Nugget nenulová, se stává z exaktní kriging

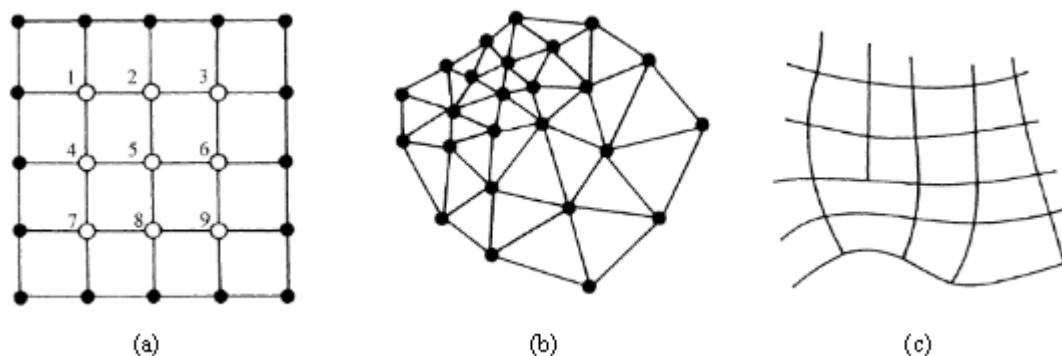
metody metodou aproximující. Výsledný interpolovaný model, podobně jako spline, přesahuje extrémní hodnoty měřených bodů, tzn. může nabývat hodnot větších i menších, než jsou naměřené body (AGRC, 2011).

5. DEM (Digital elevation model)

DEM (Digital elevation model), neboli digitální model nadmořských výšek, je tří dimenzionální reprezentace či digitální model skutečného povrchu terénu (Zhilin et al.).

Výšková data se k vytvoření DEM dají strukturovat třemi základními metodami. První metodou je pravidelná síť bodů (regular grid), druhým trojúhelníková nepravidelná síť (TIN – triangulated irregular network) a třetí liniově strukturovaná síť (counter-based network), (Moore et al., 1991).

Pravidelná síť bodů je charakterizována diskretními body, které jsou pravidelně rozmístěny do mřížky. Liniově strukturovaná síť je založena na liniích, které popisují nějaký trend. Prvním typem linií jsou vrstevnice, které jsou definovány body u kterých je známa jejich poloha v prostoru (souřadnice x a y), přičemž výška je pro všechny body jedné vrstevnice stejná. Druhým typem linií jsou tzv. linie toků, které jsou definovány stejně jako vrstevnice pomocí bodů o souřadnicích x a y, ale výšková souřadnice je proměnná (Moore et al., 1991). Pro vizualizaci dat v této práci je použita trojúhelníková nepravidelná síť, proto je podrobněji popsána v kapitole 6 této práce.



Obrázek 16: Metody strukturování výškových dat (Moore et al., 1991)

Podle Mandlaa et. Kamala (2008) je za hlavní zdroj dat pro DEM považována fotogrammetrie zemského povrchu. Pod pojmem fotogrammetrie se skrývá snímání povrchu země pomocí družic nebo letadel. U těchto metod se dosahuje přesností 0,1 až 1 metr při leteckém snímání, respektive 10 až 20 m při snímání z družice (Bašta, 2008 ex. Hengl et al. 2003).

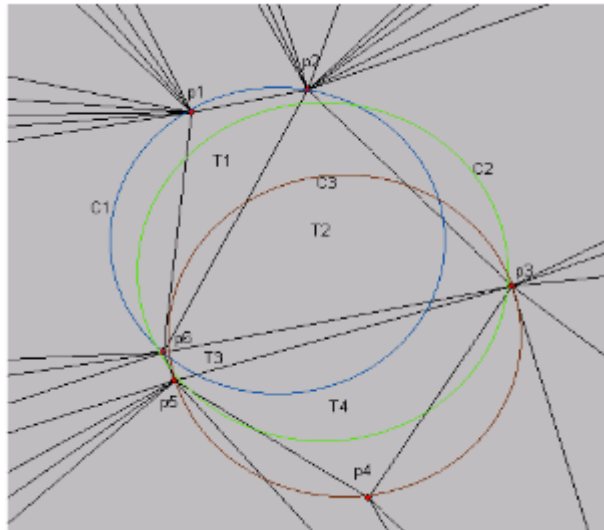
Dalšími způsoby získávání dat je přímé terénní měření, přičemž tyto typy měření dosahují největší přesnosti. Jedná se hlavně o geodetické metody jako je tachymetrie, kde se k měření používají totální stanice, které dosahují přesnosti až 0,001 m, či využití globálních polohovacích systémů (Bašta, 2008 ex. Hengl et al. 2003). Další terénní možností je například použití přijímače GPS, kde tyto přijímače dosahují centimetrové přesnosti (Chamout et. Skála, 2003).

DEM lze také nazývat DTM (digital terrain model – digitální model terénu) nebo DSM (digital surface model – digitální model povrchu). Digitální model terénu reprezentuje topografický model zemského povrchu (reliéf terénu), tzn. povrchu bez budov, stromů, a podobně, který je vytvářen počítačovými aplikacemi. Data, která se používají k vytvoření DTM, obsahují údaje o prostorových výškách v digitálním formátu a jsou obvykle reprezentovány jako obdélníkové mřížky, tedy rastry. Vegetace, budovy a další útvary, vyskytující se na zemském povrchu, jsou odstraněny digitálně. Zůstává pouze samotný terén, který leží pod těmito objekty. Naopak DSM (digital surface model) je model, který zahrnuje i objekty, které jsou zmíněny výše (Zhilin et al.).

V této práci je používán termín DTM.

6. TIN (triangulated irregular network)

TIN, neboli nepravidelná trojúhelníková síť, je struktura digitálních dat používaná v geografických informačních systémech k reprezentaci morfologie terénu. V digitálním modelování terénu je TIN reprezentace povrchu odvozená z nepravidelně rozmístěných bodových dat a zlomových linií. TIN je tvořen ze souboru hmotných bodů, vrcholů kontur nebo kombinací obojího. Tyto hmotné body mohou být odvozeny z jejich výškových hodnot. TIN se vytváří sestavením trojúhelníkových polygonů z hmotných bodů uspořádaných tak, že v kružnici opsané každému trojúhelníku se mohou vyskytovat pouze tři body, které tvoří onen konkrétní trojúhelník, a nesmí se zde vyskytovat žádný jiný bod. Tento postup se nazývá Delauneyho triangulace (Peucket et al., 1978).



Obrázek 17: Delauneyho triangulace (Bargava et al., 2013)

TIN má vektorovou strukturu dat. To zajišťuje rozdělení geografického prostoru do souvislé plochy nepřekrývajících se trojúhelníků. U TIN modelu je tedy každý vrchol trojúhelníku bod, u kterého jsou známy souřadnice x , y , z , respektive zeměpisná délka, zeměpisná šířka a nadmořská výška. Hmotné body jsou pečlivě vybírány tak, aby byl získán přesný model povrchu (Bargava et al., 2012).

Mohou být použity samozřejmě všechny naměřené body, ale přesnost TIN modelu závisí na pečlivém výběru hmotných bodů. Pokud existuje nějaká zásadní změna v morfologii povrchu, jako jsou vrcholy kopců, údolí, horní či spodní hrana útesu, atd., potom se musí vybrat ty hmotné body, které charakterizují právě tyto

terénní změny. Takové hmotné body se následně nazývají jako “dobře umístěné“ (well placed), (Hanjianga et al., 2008).

Díky své jednoduchosti a ekonomičnosti jsou TIN modely významnou alternativou rastrových reprezentací povrchu (Hanjianga et al., 2008).

Výhody TIN:

Většina dat pro digitální modelování terénu je získávána v terénu, a proto se ve většině případů jedná o data nepravidelně rozmístěná. TIN je vhodný jak pro pravidelně, tak i pro nepravidelně rozmístěné body oproti mřížkovému (rastrovému) modelu, který je vhodný pouze pro pravidelně rozmístěné body. TIN model je navíc flexibilnější než mřížkový (rastrový) model (Bargava et al., 2013).

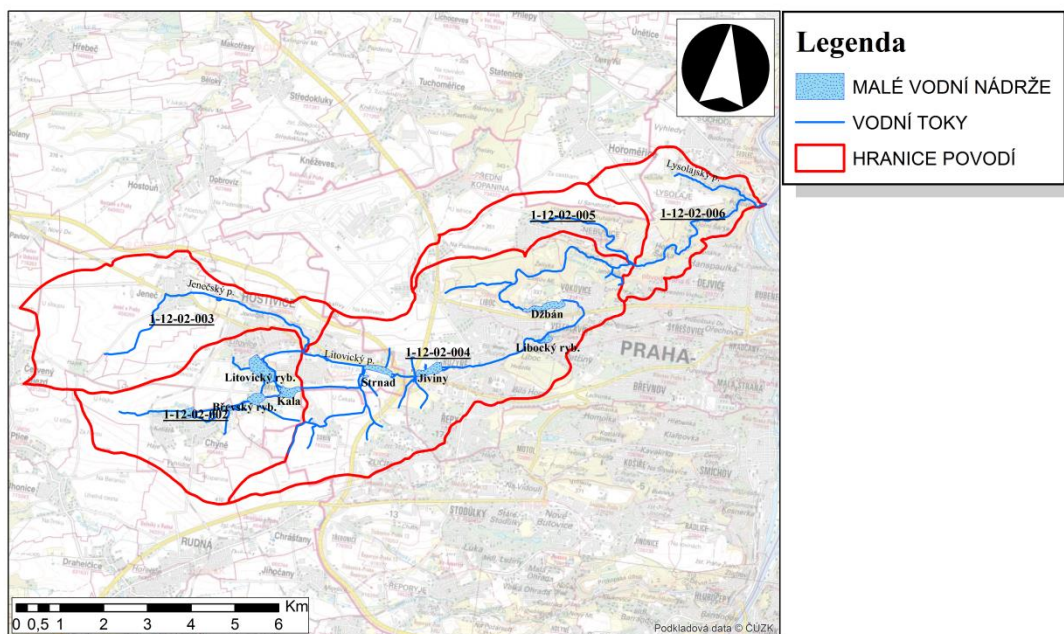
Zemský povrch je málokdy zcela plochý. Hustota dat se tedy mění se složitostí změn terénu. V mřížkových modelech se používá k reprezentaci povrchu pravidelná mřížková síť, zatímco u TINu se používá nepravidelná trojúhelníková síť. Při reprezentaci pomocí TINu lze redukovat přebytečné data, která vznikají při reprezentaci mřížkovým modelem, přičemž TIN je zvláště vynikající použit pro modelaci míst, kde se nachází komplikovaný terén, který se často ostře mění. Při reprezentaci terénu dosahuje TIN vyšší přesnosti, než kterýkoli jiný model (Bargava et al., 2012).

7. Charakteristika zájmového území

7.1. Litovicko-Šárecký potok

MVN Strnad se nachází na toku Litovicko-Šáreckého potoku. Pramen tohoto toku se nachází ve středočeském kraji u obce Chýně a tok ústí v Praze - Sedlci do řeky Vltavy. Celková délka toku je 21,28 km a plocha povodí vztažená k tomuto toku je 62,9 km². Do toku ústí několik přítoků, z nichž mezi nejvíce významné patří Nebušický, Lysolajský, Zličínský a Jenečský potok. Na toku se nachází soustava MVN, ve středočeském kraji jsou to Litovická nádrž, nádrž Kala a nádrž Břve, a na území Prahy retenční nádrž Strnad, Jiviny a vodní dílo Džbán. Nádrž Strnad je tedy první nádrž z celé soustavy, která se nachází na území hlavního města Prahy, a spadá pod správu Lesů hl. m. Prahy. Před vtokem potoku do nádrže Strnad je do něj zatrubněn výtok ČOV Hostivice. V úseku, kde tok protéká obcí Ruzyně, je tok přibližně v délce jednoho kilometru zatrubněn. Číslo hydrologického pořadí toku je 1-12-01-002, 1-12-01-004 a 1-12-10-006 (Lesy hl. m. Prahy, 2015).

POVODÍ LITOVICKO - ŠÁRECKÉHO POTOKA



Pro vytvoření tohoto layoutu bylo použito volně přístupných datových vrstev DIBAVOD.
Vypracoval: Tomáš Milaberský

Obrázek 18: Povodí Litovicko-Šáreckého potoka (Dibavod, 2015)

7.2.Nádrž Strnad

MVN Strnad se nachází na katastrálním území obce Hostivice. Jedná se o MVN průtočného typu, přičemž nádrží protéká Litovicko-Šárecký potok. Vznik MVN Strnad se datuje do roku 1958, kdy byla dokončena tehdy pouze jako suchá retenční nádrž a sloužila jako ochrana před povodní. Do současné podoby byla nádrž přebudována až po roce 1969, od kdy je také trvale napuštěna. V současné době nádrž slouží zejména pro zlepšování kvality vody v toku pod nádrží, ale také má funkci retenční, biologickou a krajinytvornou. Objem MVN Strnad čítá 114 015 m³ a plocha hladiny je 83 447 m². Hráz je vybudována jako zemní sypaná hráze o výšce 3 m (Lesy hl. m. Prahy, 2015).

V roce 2007, vlivem značného zabahnění, došlo k revitalizaci MVN. V rámci této revitalizace nedošlo pouze k odbahnění nádrže, ale také k opravě opevnění hráze a bezpečnostního přelivu a vysázení břehových porostů. V MVN bylo celkem naměřeno cca 30 000 m³ sedimentu, přičemž nejvíce sedimentu se nacházelo v místech, kde do MVN natéká Litovicko-Šárecký potok, kde byla nahromaděná taková vrstva sedimentu, že hloubka vody byla pouze 20 cm. V rámci odbahnění bylo z MVN vytěženo přibližně 25 000 m³ sedimentu (Lesy hl. m. Prahy, 2015).



Obrázek 19: MVN Strnad (vlastní)

8. Metodika

Pro batymetrická měření na MVN Strnad byl použit ADCP přístroj RiverSurveyor od firmy SonTek. Je speciálně navržen tak, aby měřil průtoky v tocích, vodní proudy ve třech dimenzích, hloubky a batymetrii. RiverSurveyor kombinuje osvědčený nejmodernější (tzv. state-of-the-art) přístroj na akustické měření Dopplerovské profilové rychlosti a výkonný balík softwarů založených na operačním systému Windows. Díky tomuto spojení je přístroj schopen měřit s velkou přesností, přičemž jeho použití je velmi jednoduché. Tento přístroj pracuje s několika akustickými frekvencemi, které kombinuje s přesným řízením šířky pásma měření, aby bylo dosaženo co nejlepších a kontinuálních výsledků při měření všech hloubek (Erdem, 2013).

Hlavní částí tohoto přístroje je měřicí jednotka s označením M9, na které jsou umístěné vysílače a přijímače zvukových pulzů. Tělo M9 disponuje devíti paprsky rozdělených do dvou sad. První sadu paprsků reprezentuje jeden vertikální paprsek o frekvenci 0,5 Mhz, tzv. vertical beam. Paprsek vertical beam dokáže měřit hloubky v rozsahu 0,2 až 80 m. Druhou sadu reprezentuje osmice šikmých paprsků, z nichž čtyři vysílají na frekvenci 3 Mhz a čtyři na frekvenci 1 Mhz, tzv. bottom track. Bottom track měří hloubky v rozsahu 0,2 až 40 m. Vertical beam vysílá jeden paprsek kolmo na dno, z něhož odhaduje hloubku. Bottom track používá pro určení hloubky čtyři šikmé paprsky, přičemž výslednou hloubku odhaduje na základě průměrné hloubky z jednotlivých šikmých paprsků. Obecně tento přístroj tedy odhaduje hloubku na základě doby, za kterou se vyslaný paprsek odražený ode dna vrátí zpět. V tomto kontextu je tedy označení ADCP do jisté míry nepřesné, protože ADCP slouží převážně k odhadu rychlosti vody v toku na základě Dopplerova jevu, resp. dopplerovské rychlosti. Pro měření hloubek je u tohoto přístroje používán princip echosoundingu, proto je v této práci označován přístroj RiverSurveyor jako echosounder. Součástí měřicího vybavení přístroje RiverSurveyor je také RTK stanice, která zajišťuje údaje o přesné zeměpisné šířce a délce a výškové údaje přístroje a předává je řídicí jednotce těla M9 (Erdem, 2013).

Data z echosounderu byla upravena tak, aby se dala použít v ArcGIS, v softwarovém prostředí "river surveyor live", a také v tabulkovém procesoru MS Excel.

Pro referenční měření a pro zaměření okolí nádrže a břehové hrany byl použit GPS přijímač GPS1200 od firmy Laica. Pro toto měření bylo využito metody tzv. diferenční GPS (DGPS). Metoda DGPS používá pro měření dvou přijímačů GPS. Jeden přijímač funguje jako referenční stanice, která stojí na bodě o známé zeměpisné šířce, délce a výšce. V případě měření prováděného v rámci této práce byla přesná poloha referenční GPS zajištěna připojením na referenční pozemní stanice GPS, tzv. ČEPOZ (česká síť permanentních stanic pro určování polohy). Druhý přijímač se používá jako pracovní stanice pro samotné měření bodů. Referenční stanice přijímá data z družic GPS, což zajišťuje nepřetržité určování přesné polohy této stanice. Poloha získaná tímto způsobem je následně porovnána s přesnou polohou referenční stanice, která byla zjištěna na začátku měření. Rozdíl těchto dvou hodnot následně určuje korekci DGPS. Díky této korekci dochází ke zpřesnění polohy pracovní GPS. Maximální odchylka GPS přijímače nepřekročila po celou dobu referenčního měření 0,03 m (Chamout et Skála, 2003; Bašta, 2008 ex. Hengl et al. 2003).

Data získaná z GPS byla upravena v programu MS Excel.

8.1. Metodika výroby soutyčů

Jak již bylo řečeno v úvodu, jedním z cílů této práce je vytvořit referenční měření, které následně bude možné porovnat s měřením pomocí ADCP, resp. echosounderem. Na základě porovnání těchto dvou měření bude následně možné určit do jaké míry je měření pomocí echosounderu přesné (vypovídající). Pro referenční měření byla zvolena absolutní metoda měření, abychom co nejvíce eliminovali vnější vlivy na přesnost měření. Proto bylo vyrobeno měřicí soutyč, pomocí kterého bylo následně měření provedeno. Před výrobou soutyčů bylo nutné stanovit několik podmínek. První podmínkou byl výběr vhodného materiálu. Materiál musí být lehký, pevný a musí s ním být co nejlehčí manipulace. Materiál musí být také vybrán tak, aby co nejméně ovlivňoval měření metodou echosounderu. To znamená, že materiál by měl být nevodivý.

Pro výrobu soutyčů, po vyhodnocení všech požadavků, byly vybrány hliníkové trubky o vnějším průměru 0,05 m a vnitřním průměru 0,048 m. Základem soutyčů byly dvě výše specifikované hliníkové tyče o délce tří metrů. Aby byla manipulace se soutyčím jednodušší, a zároveň byla zajištěna upravitelnost soutyčů na přibližnou

hloubku měřené MVN, byly třímetrové tyče upraveny na dvě dvoumetrové a dvě metrové tyče. Soutyčí je proto ve výsledku velmi variabilní a lze jej upravit na délku dvou metrů (minimální délka soutyčí), tří, čtyř, pěti a šesti metrů. Spojení jednotlivých částí soutyčí je zajištěno převlečnou hliníkovou spojkou. Zajištění tyčových dílů v hliníkových spojkách je zajištěno pomocí šroubů.

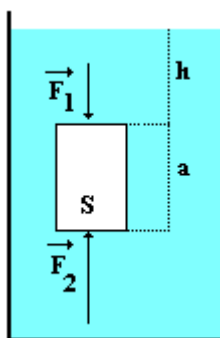
Na základní dvoumetrové tyči je namontována pomocí úhelníků čtvercová hliníková deska o velikosti 0,3x0,3 m a tloušťce 0,004 m, aby bylo eliminováno v co největší míře propadání soutyčí do sedimentu.

Pro uchycení GPS antény slouží kovový úhelník, který je nasazen na horní část soutyčí. Skrz tento úhelník je veden speciální šroub, na který se šroubuje samotná GPS anténa. Jedná se o speciální šroub o specifickém stoupání, který se shoduje se závitem na vytyčovací tyčích dodávaných výrobcem GPS přístroje. Tento šroub musel být speciálně vyroben pro toto měření. K tomu, aby bylo zajištěno srovnání soutyčí do vertikály, byl vyroben držák, na který lze nasadit krabicovou libelu.

8.1.1. Výpočet tlaku měřícího soutyčí na dno nádrže

V rámci výroby měřícího soutyčí byl vytvořen výpočet tlaku soutyčí na dno nádrže. Výpočet byl vytvořen, aby bylo možné odvodit, jak velkým tlakem působí měřící soustava na dno nádrže a na základě těchto dat odvodit do jaké míry se eventuálně může měřící soutyčí propadat do vrstvy sedimentu.

Pro výpočet byly použity základní fyzikální rovnice mechaniky kapalin. Na těleso ponořené do kapaliny působí za prvé síla gravitační, jejíž působíště je směrem kolmo ke dnu nádrže. Za druhé na těleso působí vztlaková síla, jejíž působíště je opačné gravitační síle. Toto tvrzení je zobrazeno na obrázku 20 (Reichel, 2015).



Obrázek 20: Síly působící na těleso v tekutině (Reichel, 2015)

Sílu gravitační lze definovat podle Reichla (2015):

$$F_g = mg \quad (6)$$

Kde:

- *m je rovno hmotnosti tělesa*
- *g je tíhové zrychlení*

Sílu vztlakovou lze definovat podle Reichla (2015):

$$F_{vz} = V\rho g \quad (7)$$

Kde:

- *V je rovno objemu ponořeného tělesa*
- *ρ je hustota tekutiny, ve které je těleso ponořeno*
- *g je tíhové zrychlení*

Pomocí vzorce 6 a vzorce 7 byla vypočítána síla, která působí na dno nádrže. To se provede jednoduchým vzájemným odečtením síly vztlakové od síly gravitační. Následně je nutné vypočítanou sílu, působící na dno, přepočítat na tlak. To lze provést pomocí následujícího vzorce dle Reichla (2015):

$$p = \frac{F}{S} \quad (8)$$

Kde:

- *F je síla působící na těleso*
- *S je plocha, kterou těleso působí povrch*

Jako plocha byla v našem případě použita plocha opěrné desky měřícího soutyčí o velikosti 0,09 m². Na základě výpočtu bylo zjištěno, že například při třímetrové konfiguraci a zanoření do dvou metrů působí soutyčí na dno tlakem 287,4 Pa.

8.2. Metodika výroby měřícího soulodí

Pro referenční měření je kromě měřícího soutyčí zkonstruováno také soulodí. Toto soulodí je zkonstruováno za účelem zjednodušení manipulace s měřícím soutyčím, a také kvůli větší stabilitě celé měřící soustavy a eliminaci nežádoucího

náklonu. Soulodí si lze představit jako jakýsi katamaran. Základem pro toto soulodí je kánoe Vydra a dvoumístný kajak, který je uzpůsoben pro montáž echosounderu. Tyto dvě lodě jsou spojeny dřevěnou konstrukcí. Součástí této konstrukce je také komora pro vodící lano, které je použito u referenčního měření pro vytyčení příčného profilu, a také konstrukce pro uchycení měřicího soutyčí. Základem celé konstrukce jsou dvě dřevěné latě, které spojují lodě. Obě lodě mají rozdílný výškový profil. Na straně kánoe jsou latě přímo přidělané plastovými páskami přes vyvrtané díry k výztužím lodě. Kajak je vůči kánoi nižší, proto je nutné na této straně podložit latě dřevěnými kostkami o rozměrech, které korespondují s výškovým rozdílem obou lodí. Upevnění konstrukce na kajak je realizováno pomocí upínacích popruhů s jednocestnou přezkou. Konstrukce je proto lehce sestavitelná. V prostoru mezi loděmi je na latě připevněna konstrukce z dřevěných palet. Z obou stran latí je připevněna paleta. V této konstrukci je vyrobena z dřevěných kostek vodící komora pro lano a jsou zde vyřezány vodící otvory pro soutyčí. Tyto otvory mají o kus větší průměr než je průměr soutyčí. Díky této konstrukci lze vodícími otvory prostrčit měřicí tyč, což zabezpečuje jednoduchou manipulaci s měřícím soutyčím, a rovněž zajišťuje ve velké míře vertikální srovnání soutyčí. Měřící soulodí je zachyceno na obrázku 21. Schématický nákres soulodí je zobrazen v příloze 1.



Obrázek 21: Soulodí (uprostřed středové konstrukce lze vidět měřící soutyčí) (vlastní)

8.3. Metodika referenčního měření

Pro měření byl vybrán vhodný příčný profil. Na obou stranách nádrže v ose vybraného příčného profilu byly zatlučeny do země kolíky, které musely být dostatečně velké a silné, aby nedocházelo k jejich vytažení ze země vlivem sil, které na kolíky vyvíjelo natažené lano a pohyb měřicího soulodí. Mezi těmito kolíky bylo nataženo statické horolezecké lano, které tvořilo linii měřeného příčného profilu, tedy linii pohybu měřicí lodi. Před samotným použitím soulodí, jehož součástí je i echosounder, bylo nutné kalibrovat měřicí jednotku echosounderu. Kalibraci bylo nutné provést s celým soulodím, aby se eliminovaly případné vlivy soulodí na měření metodou echosoundingu. Kalibrace se provádí tak, že osoba (v případě soulodí 4 osoby), která kalibraci provádí, drží měřicí loď zvednutou ve vzduchu a současně provádí dva specifické pohyby zároveň. Prvním pohybem je krouživý pohyb po vodorovné ose. Druhým pohybem je naklánění (výkyv) ve vertikále o rozsahu přibližně 45° nahoru a dolů od vodorovné roviny. Čas kalibrace nesmí být kratší než 90 sekund. Po úspěšné kalibraci lze soulodí spustit na vodu a vodící lano, které tvoří osu měření, protáhnout skrz vodící komoru pro lano.

Měření prováděli tři měřiči. První obsluhoval měřicí soutyčí a prováděl jeho stabilizaci do vertikální (přímé) polohy podle krabicové libely. Druhý měřič obsluhoval kontroler GPS přístroje, tudíž prováděl samotné referenční měření. Třetí měřič se staral o pohyb soulodí po vodícím laně. Následně bylo provedeno měření prvního soubor dat.

8.3.1. Postup měřičského týmu při získávání dat

V prvním souboru prováděla měřičská skupina obě měření současně. To znamená, že současně se měřilo metodou echosoundingu i GPS přístrojem, tedy měřícím soutyčím. U echosoundingu byl zapnut režim měření, přičemž měření pokračovalo až na druhý břeh kontinuálně bez přerušení. Měření GPS přístrojem bylo prováděno v pravidelných intervalech. Na každém měřeném místě došlo k aretaci lana, aby nedošlo k nechtěnému pohybu. Následně bylo měřicí soutyčí spuštěno na dno a vyrovnáno do vertikální polohy krabicovou libelou. Měřič, který obsluhoval GPS kontroler, provedl zmáčknutím klávesy zaměření bodu. Tento postup se opakoval po celém profilu měření v pravidelných intervalech přibližně jednoho metru. Po projetí a změření celého příčného profilu byl první soubor měření

ukončen. Po následném zpracování dat a vyhodnocení výsledků společného měření obou metod bylo zjištěno, že změřená data metodou echosoundingu jsou ovlivněny měřicím soutyčím, respektive přítomností kovových částí v něm. V souvislosti s tímto se měřičská skupina rozhodla změřit druhý a třetí soubor dat. Druhý soubor dat představoval samostatné měření soutyčím při stejném postupu jako u prvního souboru dat. Po změření druhého souboru dat bylo měřicí soutyčí odstraněno a následně probíhalo měření třetího souboru dat. Třetí soubor dat probíhal pouze metodou echosoundingu, aby nedocházelo k ovlivňování měření soutyčím. Měření referenčních dat je zobrazeno na obrázku 22.



Obrázek 22: Měření referenčních dat (vlastní)

8.4. Metodika zpracování dat v ArcGIS – referenční měření

Data, která byla použita pro vytvoření digitálního modelu terénu (DTM), jsou bodová data, která byla naměřena pomocí echosounderu, a to z třetího měsíce 2015. Dále byla použita bodová data získaná GPS přístrojem Leica GPS1200, přičemž tato data reprezentují břehovou hranu nádrže a terénní změny v okolí nádrže. Rovněž byla použita data měřena měřicím soutyčím s namontovaným přístrojem Leica GPS1200 a data měřená echosounderem. Tato data reprezentují dno nádrže v jednom příčném profilu, ve kterém je provedeno srovnání referenčního měření.

Vstupní data pro vypracování výsledků měření je nejprve třeba převést do jednotného koordinačního systému. Tato operace se provede pomocí nástroje “*project*“. Tento nástroj slouží pro konverzi z jednoho souřadnicového systému do druhého. Naměřená data byla sjednocena do koordinačního systému WGS1984 UTM ZONE33M.

Aby bylo možné porovnat měření pomocí echosounderu a měření soutyčím, je nutné zavést jisté zjednodušení do zpracování naměřených dat. Toto je nutné z toho důvodu, že prosté srovnání naměřených dat by nemělo správnou vypovídající hodnotu. Je to způsobeno tím, že data měřená dvěma rozdílnými metodami a přístroji pochopitelně nemohou být přímo srovnatelná, a to především díky tomu, že data nejsou stejně prostorově rozmístěna. Data jsou díky rozdílným technikám měřena na linii měření v nestejných intervalech, a zároveň jsou od sebe navzájem vzdálena zhruba půl metru kolmo na směr měření v důsledku konstrukce měřicího soulodí. Měření těmito dvěma technikami ve zcela totožných bodech je v podstatě nemožné. Proto bylo do zpracování dat vneseno zjednodušení, a to následující. Na základě vstupních vrstev bylo vytvořeno několik DTM, přičemž každý reprezentuje DTM pro jednotlivý soubor měření na linii měření. Následně byla vytvořena linie měření, která je umístěna v místě, kde bylo nataženo vodící lano pro soulodí, a ze které se pomocí extenzí v programu ArcGIS odečetly nadmořské výšky jednotlivých DTM na této linii. Vše je podrobněji popsáno v následujících odstavcích.

K vytvoření DTM byl použit nástroj “*Topo To Raster*“. Jak již bylo řečeno, jedná se o nástroj, který byl speciálně vytvořený pro geografické informační systémy, přičemž digitální model terénu vytvořený tímto nástrojem je hydrologicky korektní. Prvním krokem při tvorbě (DTM) je načíst požadovaná data do programu

ArcGIS. Dalším krokem je vyhledání nástroje “Topo To Raster“ v menu “Tollbox“ v extenzi programu, která je pojmenovaná Spatial Analyst.

Prvním krokem při zadávání vstupních parametrů a nastavení nástroje Topo To Raster je volba vrstev, ze kterých bude proveden výpočet. V našem případě je to bodová vrstva batymetrie celé nádrže z roku 2015, bodová data břehové hrany a okolí nádrže, a všechna měření, která byla vytvořena pro účel srovnání s referenčním měřením. Bodová vrstva batymetrie z desátého měsíce 2014 nebyla pro tento úkol použita, aby neovlivňovala výsledky referenčního měření, protože s časovou prodlevou mezi měřeními mohlo dojít k přírůstku sedimentu v nádrži. V tomto úkolu bylo vytvořeno několik DTM, kdy k vytvoření každého byla použita bodová batymetrická data celé nádrže z roku 2015, bodová data břehové hrany a terénu v okolí nádrže a vždy jedno měření, které bylo vytvořeno pro účely referenčního měření, tedy jedno z měření provedené na měřicí linii. U vstupujících dat bylo nastaveno z jakého pole atributové tabulky vrstvy se mají pro výpočet čerpat data (nadmořské výšky) a jaký je typ vstupujících dat (bodový). Dále bylo nastaveno rozlišení výchozího rastru (output cell size), a to na hodnotu 1x1 metr, byl nastaven primární typ vstupujících dat na bodová a bylo nastaveno, aby nástroj při výpočtu tzv. “zaplnil“ prohlubně (povrchové deprese), které se mohou vlivem výpočtu ve výsledném modelu nacházet (parametr Drainage enforcement, nastavení ENFORCE). Vysvětlení této problematiky spočívá v tom, že nástroj “*Topo to Raster*“ může ve výsledném DTM zobrazovat deprese povrchu, které ve skutečnosti neexistují. Toto nastavení napomůže, aby výsledný interpolovaný DTM lépe reprezentoval skutečný stav. Na druhé straně se tímto nastavením stává DTM do jisté míry hydrologicky nekorektním. Aby byl tento model zcela hydrologicky korektní, musely by být všechny deprese povrchu ve skutečném terénu přesně identifikovány ve vstupních datech.

Ve výsledku tedy vzniklo pět DTM, které charakterizovaly nadmořské výšky dna vždy pro konkrétní měření na linii měření. To, že byla použita data (data z měření na linii), která mají o několik řádů hustší prostorové rozmístění, než data celé nádrže či jejího okolí, způsobí to, že výsledné DTM jsou v této oblasti přesnější.

Dalším krokem tedy bylo vytvoření liniové vrstvy, která charakterizovala linii měření a na které budeme odečítat hodnoty pro následné srovnání. To se provede tak,

že se vytvoří nová vrstva formátu .shp, do které se následně za pomoci editoru vytvoří linie, na které bylo prováděno měření.

Posledním krokem je použití funkce “*Stack Profile*“, která na základě rastru DTM a vytvořené liniové vrstvy vytvoří tabulku, kde v jednom sloupci jsou zobrazeny hodnoty délek, tedy poloha měřicího přístroje na linii, bráno od břehu a v druhém sloupci hodnoty výšek, korespondující se vzdáleností od břehu. Interval, ve kterých jsou hodnoty rastru odečítány, jsou defaultně nastaveny samotnou funkcí a řídí se rozlišením rastru, který je použit v této analýze. V případě těchto dat se jedná o vzdálenost cca 0,8m. Takto vytvořené tabulky hodnot lze následně porovnat.

8.4.1. Vizualizace dat v R – referenční měření

Porovnání jednotlivých měření bylo zpracováno ve statistickém programu R ve verzi 3.1.3. Data, která byla vytvořena v programu ArcGIS, jsou ve formátu dbf. Tento formát lze otevřít v tabulkovém procesoru MS Excel a následně uložit ve formátu xls. Tento krok byl proveden z toho důvodu, že program R nedokáže pracovat s tabulkami ve formátu dbf. Aby bylo možné načíst do R data ve formátu xls, je nutné stáhnout balíček s názvem gdata, který tuto funkci umožňuje. Dalším nutným krokem pro umožnění nahrání dat ve formátu xls je potřeba mít nainstalovaný program PERL, což je interpretovaný programovací jazyk. Na tento program je následně nutné odkázat v příkazu pro načtení dat. Výsledkem zpracování dat v programu R je obrázek 23.

8.5. Metodika zpracování dat v ArcGIS – Batymetrie nádrže

Vstupem pro jednotlivé výpočty byla bodová data batymetrie nádrže naměřená echosounderem a bodová data břehové linie a průběhu terénu v okolí nádrže měřená GPS přístrojem. Byly tedy vytvořeny dva DTM. Jeden, který charakterizuje batymetrii nádrže k červenci 2014, a druhý charakterizující batymetrii nádrže k březnu 2015. Pro vytvoření DTM z července 2014 byly použity data z tohoto měsíce naměřená echosounderem a zároveň data z GPS. Analogicky pro vytvoření DTM z března 2015 byla použita data z března 2015 z echosounderu a rovněž data z GPS. Výsledné DTM jsou tedy ve výsledku rozdílné pouze v oblasti nádrže. Data okolí nádrže byla použita, aby došlo ke zpřesnění modelu v oblasti břehové hrany.

K vytvoření DTM byl opět použit nástroj “*Topo To Raster*“ se stejným nastavením jako při zpracování dat referenčního měření. Raster, který vznikl tímto krokem, byl následně oříznut pouze na velikost nádrže nástrojem “*extract by mask*“. Tento krok byl použit, aby v následném zpracování dat bylo možné vypočítat objem nádrže. Rastr, který byl vytvořen v předchozím kroku, byl dále použit pro vytvoření TIN. Posledním krokem bylo vypočítat pro jednotlivé DTM objem nádrže. K výpočtu objemu byla použita funkce “*surface volume*“, kdy vstupní data reprezentoval vždy jeden z TINů a byl nastaven parametr reference plane, který určuje, zda se bude počítat objem povrchu pod nebo nad referenční plochou. Referenční plochu si lze představit jako plochou desku o stejné nadmořské výšce ve všech svých bodech, přičemž informaci o výšce této desky v prostoru ArcGIS určuje z nejvyšší hodnoty výšky v DTM, která do výpočtu vstupuje. Porovnání výsledných DTM se zobrazením naměřených bodových vrstev je na obrázku 27. Samotné porovnání výsledných DTM je potom zobrazeno na obrázku 28.

9. Výsledky

9.1. Referenční měření

Vyhodnocení dat pro referenční měření bylo zpracováno v programu ArcGIS při využití funkcí tohoto programu a následně byla data vizualizována statistickým programem R.

9.1.1. Vyhodnocení zpracovaných dat – referenční měření

V grafu na obrázku 23 je vidět srovnání měření soutyčím a měření echosounderem, a to jak Vertical beam paprskem tak Bottom-track paprskem. Jedná se o data, která byla pořízena na linii měření cestou od pravého břehu na levý břeh nádrže. Ještě před tím, než se provede celkové srovnání jednotlivých metod, je dobré poukázat na zjevné chyby při měření soutyčím (modrá linie). Jedná se konkrétně o místo, které je dle osy x ve vzdálenosti zhruba mezi 60 a 70 metry a místo, které se nachází zhruba okolo 90 metrů od počáteční hodnoty osy x. Jak je z tohoto grafu patrné, průběh křivky se v těchto místech rapidně mění. Jedním způsobem jak tyto chyby ve výsledcích vysvětlit je chyba měřitele, kdy mohlo dojít jeho vlivem k nedostatečnému zasunutí měřícího soutyčí do vody, což způsobilo změření jiné hodnoty výšky dna, než ve skutečnosti byla. Druhá možnost, která se nabízí v souvislosti s těmito chybami, je nějaké těleso, např. zetlelé dřevo či kámen, které mohlo ležet na dně nádrže a při měření byla odečtena nadmořská výška tohoto tělesa a ne samotného dna. Zde vzniká otázka, proč toto těleso nebylo zachyceno i echosounderem. Toto má jednoduché vysvětlení. Echosounder je na měřícím soulodí umístěn zhruba ve vzdálenosti 0,4 metru kolmo na linii měření od soutyčí. Díky tomuto echo-sounder měří batymetrii profilu, který je zhruba o 0,4 metru vzdálen od profilu měřeného soutyčím. Díky tomuto faktu echosounder nezachytil útvar na dně.

Pokud jde o celkové porovnání obou metod měření, lze si všimnout tohoto průběhu křivek. Jak je vidět, jednotlivé typy paprsků tzn. bottom track (zelená linie) a vertical beam (červená linie), mají v celém rozsahu grafu v podstatě stejný průběh. Tyto dvě linie se v některých úsecích rozcházejí maximálně o několik centimetrů, jinak je jejich průběh zcela totožný. Pokud se provede porovnání křivky získané z měření soutyčím a křivek z echosounderu, a pokud nebudou brány v potaz dvě

chyby měření, které jsou popsány výše, je vidět, že na levé straně grafu v obrázku 23 je průběh těchto křivek rozdílný. Stejně tak mají křivky rozdílný průběh na pravé straně grafu. Na pravé straně je vidět, že jsou hodnoty měřené soutyčím přibližně o 15 centimetrů větší, než křivky z echosounderu. Na levé straně jsou naopak větší hodnoty z echosounderu o cca stejnou hodnotu. Ve střední části jsou všechny linie téměř shodné.

První možností, která se nabízí, je bezpochyby chyba měřitelů. Tam, kde jsou hodnoty měřené soutyčím nadhodnoceny, mohlo docházet k nedostatečnému zanoření soutyčí do vody a naopak tam, kde jsou tyto hodnoty podhodnoceny, docházelo přílišným tlakem měřitele na soutyčí k protlačování opěrné desky do sedimentu.

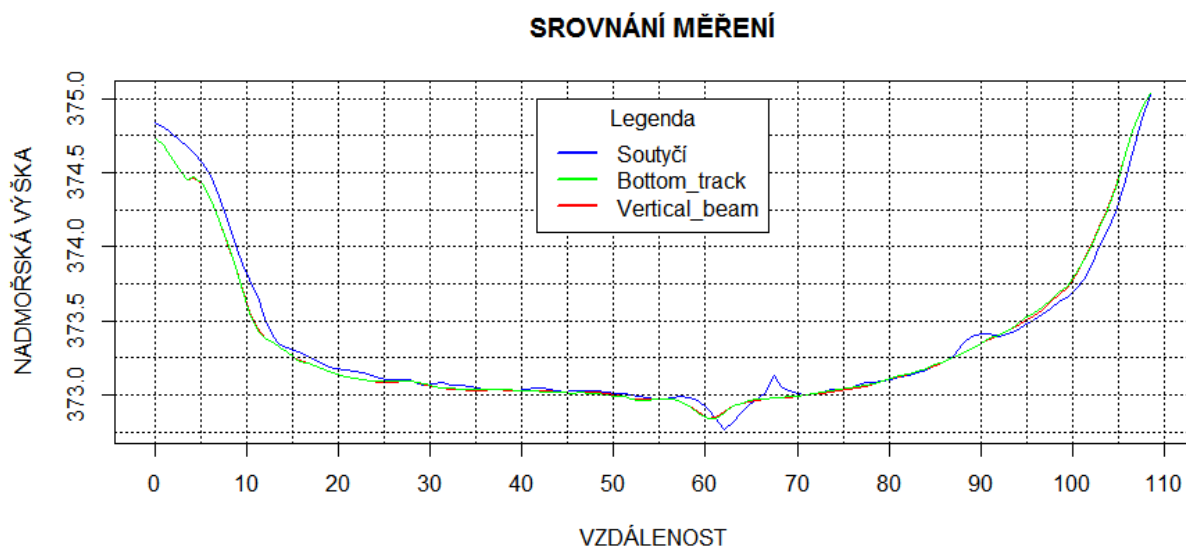
Další možností jak mohlo dojít k nestejnému průběhu linií je, že zde hraje roli morfologie dna nádrže. Jak již bylo řečeno, měření oběma způsoby neprobíhá zcela na stejných místech. Echosounder měřil blíže hrázi nádrže než soutyčí. V případě, že v místě kde probíhalo měření má dno nádrže velký sklon (myšleno sklon kolmo na měřící linii), mohlo vlivem nestejného místa měření dojít k tomuto rozdílu. Jednoduše řečeno echosounder měřil hloubku dna o přibližně 0,4 metrů blíže k hrázi, kde díky velkému podélnému sklonu nádrže může být rozdílná hloubka. Toto tvrzení koresponduje s levou částí grafu na obrázku 23. Nicméně tato domněnka nevyhovuje pravé části grafu, kde je měření soutyčím pod úrovní měření echosounderem. V kontextu tohoto tvrzení by to znamenalo, že podélný sklon v nádrži má v těchto místech stoupající tendenci směrem k hrázi nádrže. Zde je možné konstatovat, že morfologie dna nádrže v těchto místech může mít tento průběh, nicméně je to nepravděpodobné.

Jedním z dalších možných vysvětlení těchto rozdílů je fakt, že zvukové vlny, které vysílá echosounder, mohou pronikat velmi jemným sedimentem (sapropelém), přičemž měřící soutyčí, díky tomu, že vyvíjí na dno pouze malý tlak, tímto jemným sedimentem neproniká. Toto tvrzení ovšem opět nelze vztáhnout na celý průběh grafu na obrázku 23. S levou částí toto tvrzení koresponduje, ovšem s pravou částí grafu ne.

Pokud vezmeme v potaz systematickou chybu při zpracování dat v programu ArcGIS, lze spatřovat rozdílné výsledky také právě v tomto způsobu zpracování

naměřených dat. Díky faktu, že data získaná z echo-souderu mají větší prostorovou hustotu než data z měřícího soutyčí, lze předpokládat, že díky zjednodušení, které je popsáno v metodice zpracování výsledků v ArcGIS, mohou být výsledky zkresleny. Jinými slovy rozdílnost průběhu linií lze přičíst malému množství bodů u dat měřených soutyčím. DTM vytvořený z dat měřených echosouderem má v inkriminovaných místech okolo měřeného příčného profilu větší přesnost, než DTM vytvořený z dat měřených soutyčím, právě díky větší hustotě naměřených bodů. Řešením tohoto problému by mohlo být nové a hustější zaměření pomocí soutyčí.

Další možnost, která připadá do úvahy ve vysvětlení rozdílnosti, je také metoda zpracování dat, která byla získána přímo z měřících přístrojů. Je pochopitelné, že oba přístroje použité v této práci na měření dat zaznamenávají data v jiných souřadných systémech. V rámci zpracování dat dochází k překlopení dat z původních souřadných systémů, které byly pro oba přístroje rozdílné, do souřadných systémů pro oba soubory dat totožných. Díky tomuto kroku lze data zpracovávat a porovnávat je. V tomto kroku mohlo dojít při zpracovávání dat k metodické chybě, či jiné chybě, která způsobila to, že jeden soubor dat má chybně udané souřadnice, resp. změřené body jsou posunuty o určitou vzdálenost vůči své skutečné poloze. Toto posunutí se pochopitelně projeví také při zpracovávání dat v programu ArcGIS, a následně také při vytváření DTM z těchto dat. Toto tvrzení se jeví při podrobném prozkoumání grafu na obrázku 23 jako nejvíce pravděpodobné. Je vidět, že v případě, kdy by se modrá linie posunula směrem doleva, průběhy jednotlivých linií by byly téměř shodné.



Obrázek 23: Srovnání jednotlivých měření (vlastní)

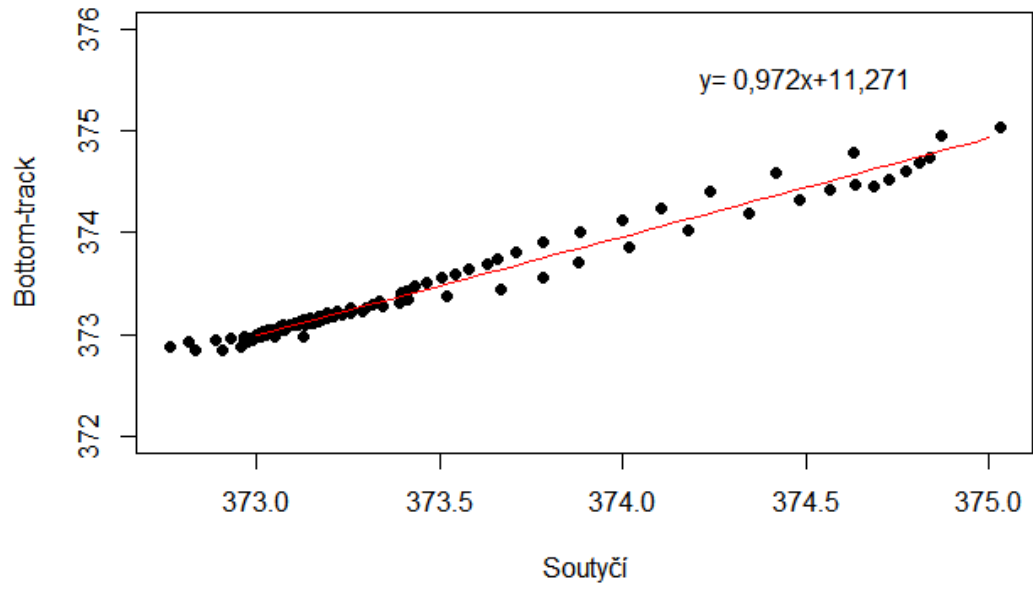
V tabulce 2, je uvedeno srovnání korelačních koeficientů mezi jednotlivými datovými soubory. Jak je zřejmé, hodnoty korelačních koeficientů nabývají hodnot velmi blízkých číslu 1. To znamená že, mezi jednotlivými datovými soubory existuje téměř zcela přímá statistická závislost.

Korelační koeficienty mezi jednotlivými soubory dat		
Soutyčí	0,989	Bottom track
Soutyčí	0,991	Vertical – beam
Bottom track	0,999	Vertical - beam

Tabulka 2: Srovnání korelačních koeficientů mezi jednotlivými datovými soubory (vlastní)

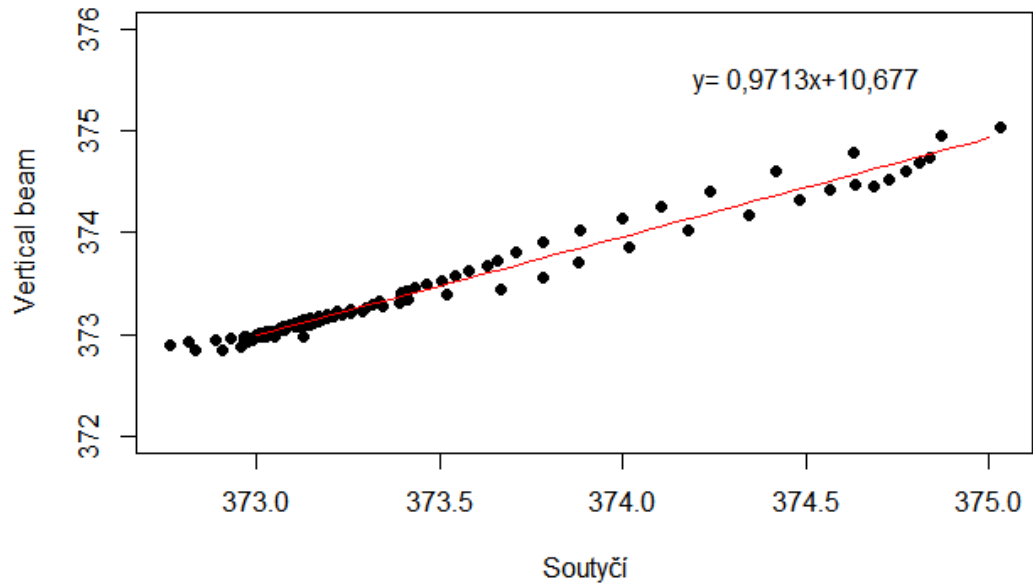
Toto vyplývá i z obrázků 24, 25 a 26, které reprezentují regresní přímky pro porovnání jednotlivých datových souborů. Součástí každého grafu je i rovnice regresní přímky s regresními koeficienty.

REGRESNÍ PŘÍMKA

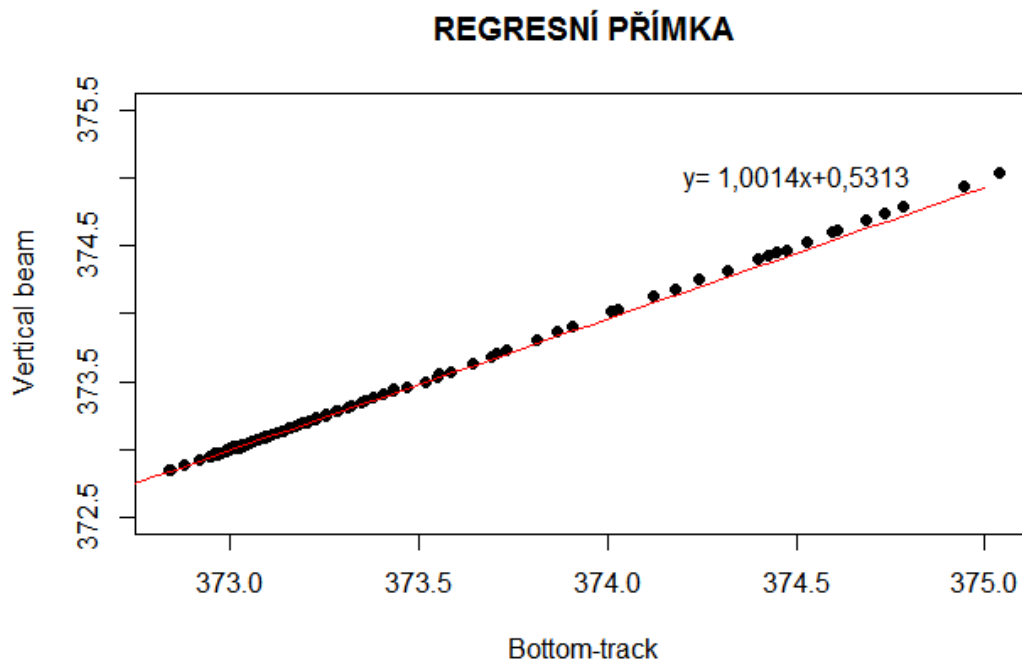


Obrázek 24: Regresní přímka - Soutyčí x Bottom-track (vlastní)

REGRESNÍ PŘÍMKA



Obrázek 25: Regresní přímka - Soutyčí x Vertical beam (vlastní)



Obrázek 26: Regresní přímka - Vertical beam x Bottom-track (vlastní)

9.2. Batymetrie nádrže

Jedním z cílů této práce je také porovnat batymetrii nádrže měřenou echosounderem mezi dvěma měřeními, které proběhly s časovým rozdílem. První měření bylo provedeno v červenci 2014, druhé měření v březnu 2015. Zpracování těchto dat bylo provedeno v programu ArcGIS. Ze vstupních dat byly vytvořeny DTM a následně z nich byly vypočítány objemy nádrže.

9.2.1. Vyhodnocení zpracovaných dat

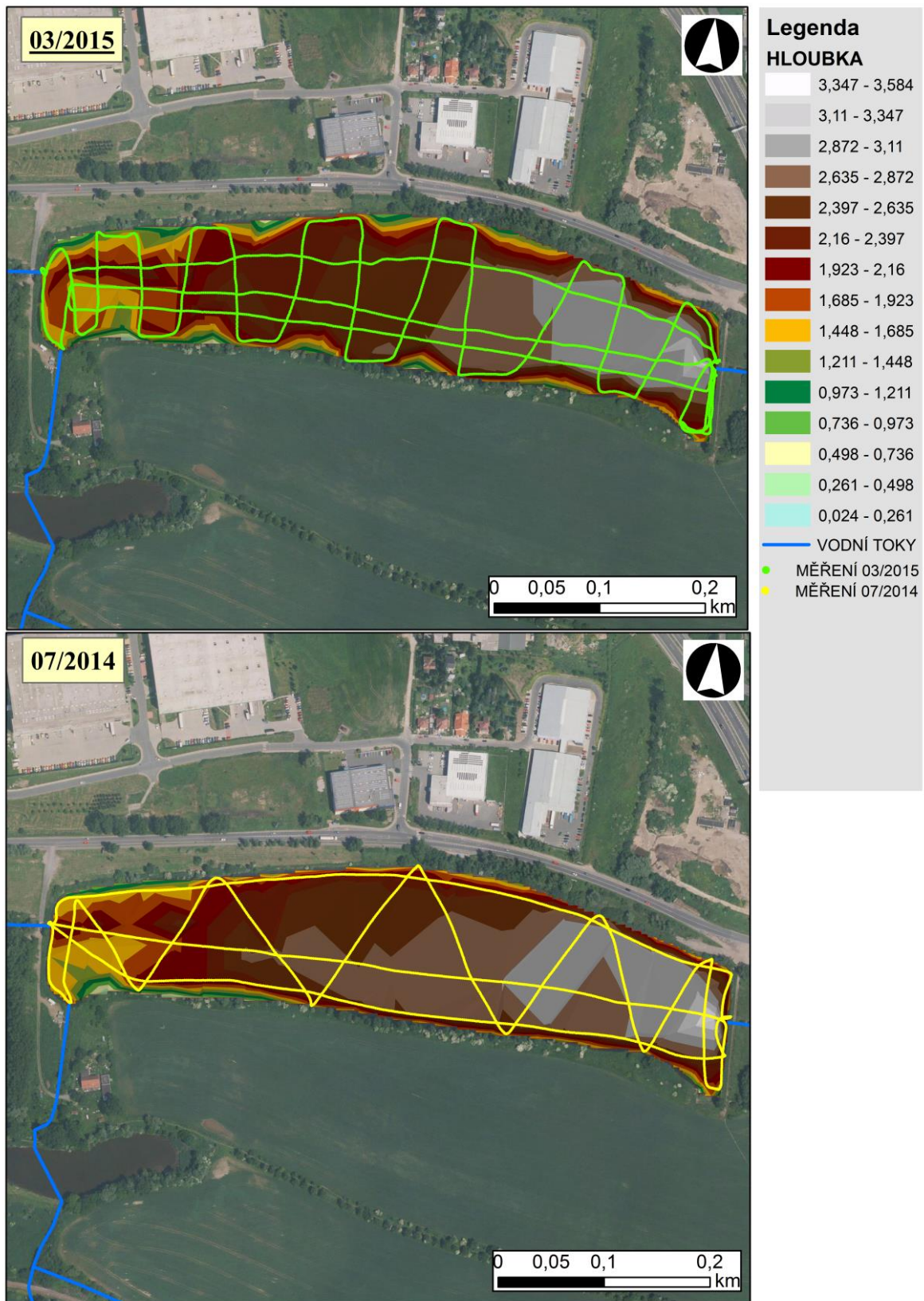
Na základě naměřených dat z echosounderu a zpracování dat v ArcGIS bylo zjištěno, že přibližný objem nádrže v červenci 2014 byl $102843,6 \text{ m}^3$ a v březnu 2015 $101371,4 \text{ m}^3$. Lze konstatovat, že výsledky mohou korespondovat se skutečností. Z dat plyne negativní trend využitelného objemu nádrže, který se v průběhu času snižuje, což je pravděpodobně způsobeno zanášením nádrže sedimenty.

Je ovšem nutné zmínit nejistoty, který vznikly při získávání dat. V současné době neexistuje žádná metodika, která by určovala, jakým způsobem by se měla data získávat. Respektive, neexistuje doporučený postup

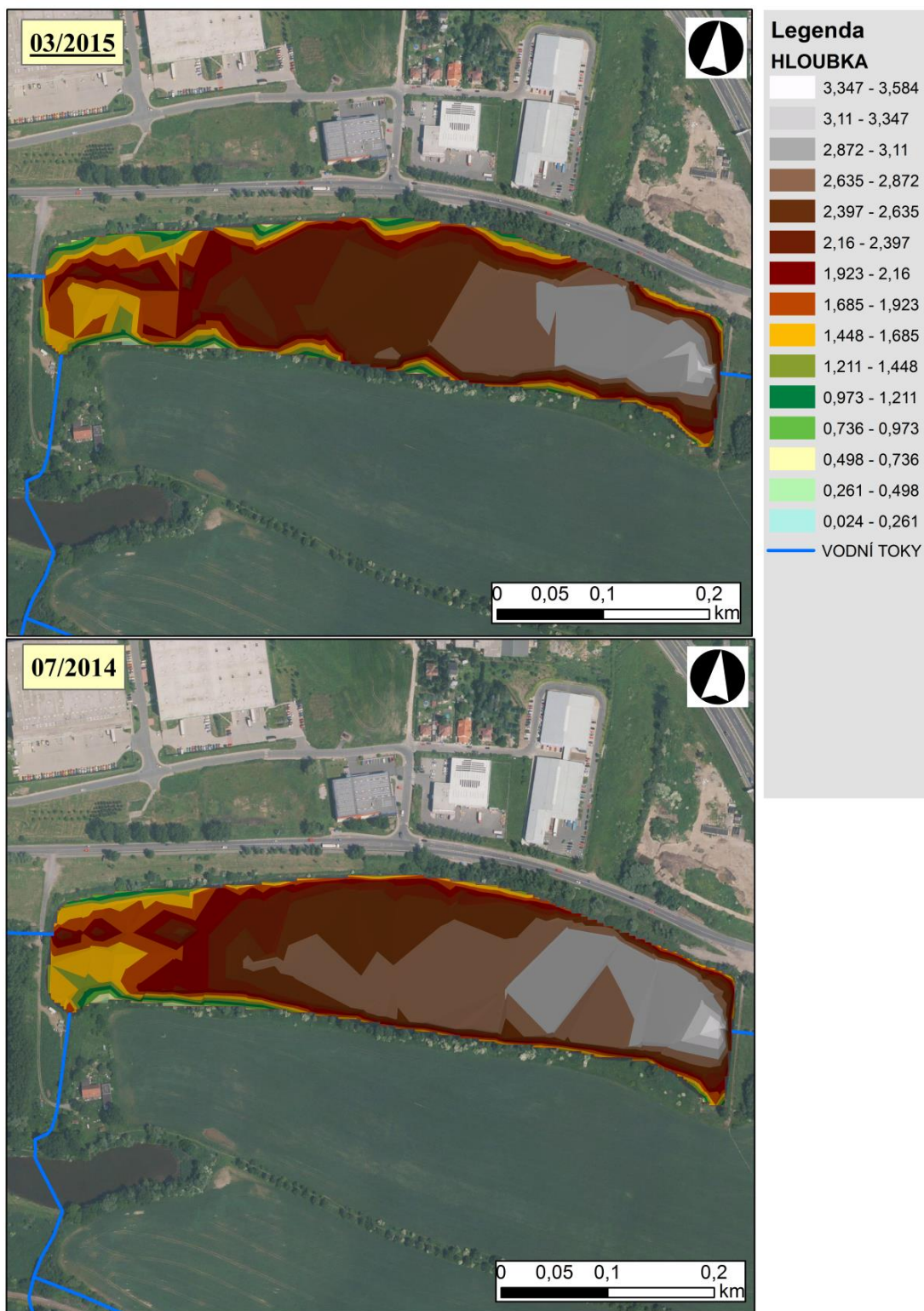
Oba datové soubory, které byly použity pro vytvoření digitálních terénních modelů, mají rozdílnou prostorovou hustotu a prostorové rozmístění získaných dat, jak je vidět na obrázku 27. To může ve výsledku zkreslit výsledný DTM, a tím pádem mohly být zkresleny i výsledné objemy. U obou souborů dat se vyskytují místa, která nejsou dostatečně zmapována, a v důsledku této nedokonalosti měření dochází k tomu, že interpolovaný povrch je zkreslen. Těchto zkreslení si lze všimnout na obrázku 28 u DTM z března 2015, kde došlo k nedostatečnému zaznamenání hloubek podél břehové hrany nádrže a dochází zde ke zkreslení DTM (obloukové výstupky směrem ke středu nádrže).

Nicméně, jak je vidět na obrázku 27, oba soubory dat mají poměrně husté prostorové rozmístění měřených bodů v části nádrže, kde do nádrže přitékají potoky. Díky tomu, že je v těchto místech prostorová hustota dat poměrně velká, má v těchto místech výsledný DTM vyšší přesnost. Pokud se podíváme na obrázek 28, lze vidět u obou DTM, že právě v této inkriminované části nádrže je nádrž zanesena sedimentem. Toto je zřetelné zejména v západní části nádrže u pravého břehu v oblasti, kde vtékají do nádrže potoky.

Obecně lze říci, že DTM zobrazené na obrázku 28 mohou korespondovat se skutečným stavem nádrže. Samozřejmě DTM vznikly z naměřených hodnot a naměřené hodnoty nemohou nikdy stoprocentně odpovídat skutečnému stavu.



Obrázek 27: Porovnání DTM nádrže a zobrazení naměřených bodů. 07/2014 a 03/2005



Obrázek 28: Porovnání DTM nádrže 07/2014 a 03/2015

10. Diskuze

Jednou z možností, jak podpořit v následném výzkumu potvrzené hypotézy této práce, by bylo provést referenční měření na jedné nádrži v několika příčných profilech a opakovaně. Tímto způsobem by se vyloučily hrubé chyby, které vznikají nepozorností měřitele nebo nepředvídatelnými okolnostmi. Rovněž by ke zpřesnění výsledků přispěla větší prostorová hustota dat na měřeném příčném profilu při měření soutyčím. To znamená, že měření soutyčím by se provádělo v malých intervalech.

Dalším způsobem, kterým by se dalo dosáhnout lepších výsledků, je úprava měřícího soulodí tak, aby se místo, kde měří echosounder a místo, ve kterém měří soutyčí, nacházelo v co nejmenší vzájemné vzdálenosti. Jde o to, že díky konstrukci soulodí, které bylo použito k měření dat pro tuto práci, měřily obě metody vlastně dva příčné profily, které od sebe byly vzdáleny přibližně 0,4 m. Pokud by se tedy podařilo vytvořit způsob, jakým zajistit co nejmenší vzdálenost mezi echosounderem a měřícím soutyčím, došlo by k jistému zpřesnění výsledků.

Jedním z dalších způsobů jak prokázat, že měření echosounderem udává věrohodné výsledky, by bylo provést referenční měření na několika typech nádrží. Tím je myšleno například rozdílná morfologie povrchu v jednotlivých nádržích, ale také například rozdílný druh sedimentu, respektive jeho jiná struktura lišící se v každé nádrži. Díky jiné struktuře sedimentu by mohlo docházet k propadání měřícího soutyčí do sedimentu, nebo naopak by mohly pulzy vysílané echosounderem pronikat jemným sedimentem a zkreslovat výsledky měření. Nádrž Strnad, na které probíhalo referenční měření, byla odbahněna, jak již bylo řečeno v roce 2007. Dá se předpokládat, že v této nádrži bude zatím malé množství sedimentu. Kdyby měření probíhalo například na nádrži, kde odbahnění zatím neproběhlo, tak díky velkému množství a velké nehomogenitě sedimentů je možné, že by výsledky měření vedly k jiným závěrům, než jsou prezentovány v této práci. Bylo by tedy žádoucí provést referenční měření na několika nádržích, přičemž by bylo dobré, aby každá z nádrží měla své charakteristické znaky, a následně sledovat do jaké míry se budou výsledky měření z jednotlivých nádrží lišit. Ovšem měření o takovém rozsahu sahá nad rámec této diplomové práce.

Samozřejmě je problém, že v současné době neexistuje žádná metodika, podle které by se řídilo získávání (najíždění na lodi) dat na MVN pomocí echosounderu. Jak je vidět na obrázku 27, měření batymetrie nádrže, která jsou srovnávána v této práci, jsou naježděna na lodi zcela jiným způsobem. Je pochopitelné, že díky tomuto rozdílnému způsobu získávání dat se bude lišit i výsledný DTM, a to například i v případě, kdy by došlo k opakovanému měření neprodleně po prvním měření. To, že v některých místech je poměrně velká plocha, kde chybí data, může zkreslovat model do té míry, že nemá správnou vypovídající hodnotu. Je zřejmé, že opakovaná měření nemohou být zcela na stejných místech už jen proto, že měření je prováděno z lodi. Pochopitelně, bylo by možné vytvořit linie měření například pomocí natažení vodících lan, avšak tento způsob by byl velice časově i finančně náročný. Pokud by byla zpracována metodika, podle které by se při získávání dat postupovalo ve všech případech stejně, dosahovalo by se relevantních výsledků.

V neposlední řadě by stálo za úvahu zlepšit metodiku zpracování dat v ArcGIS, či použít ke zpracování nějaký jiný software. Jak již bylo řečeno v kapitole 8.4., bylo pro zpracování dat v ArcGIS použito jisté zjednodušení. Pokud by se podařilo vyvinout nějaký jiný způsob zpracování dat je rovněž možné, že by se podařilo dosáhnout větší přesnosti zpracovaných dat.

Dále je nutné diskutovat problémy, které nastaly při zpracovávání dat, resp. chybu při sjednocování koordinačních systémů jednotlivých datových sad. Jak již bylo řečeno, v rámci okomentování výsledných dat referenčního měření vznikla hypotéza, že nestejný průběh jednotlivých křivek měření je způsoben chybou v koordinačních systémech jednotlivých datových sad. Díky tomu je měření soutyčím posunuto vůči měření echosounderem. Tento problém se při zpracování dat v rámci této práce nepodařilo zatím odstranit. Z výsledného grafu prezentovaného v této práci jasně vyplývá, že pokud by se tento problém podařilo vyřešit, výsledné průběhy křivek, reprezentujících jednotlivé způsoby měření, by byly téměř totožné.

11. Závěr

Předmětem této práce bylo vypracovat postup referenčního měření batymetrie, které bylo následně srovnáno s měřením přístrojem ADCP, resp. echosounderem.

Referenční měření bylo provedeno proto, aby bylo prokázáno, že měření batymetrie novými metodami, konkrétně tedy měření pomocí echosounderu, udává věrohodné výsledky. Na základě výsledků lze konstatovat, že tuto hypotézu tato práce potvrdila. Hodnoty naměřené současně odpovídaly výsledkům naměřeným pomocí echosounderu. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že měření echosounderem udává relevantní (přesné) výsledky. Je pravdou, že průběh batymetrie v měřeném příčném profilu se liší v některých místech přibližně o 15 centimetrů. To je ovšem způsobeno chybou ve zpracování dat, kterou se zatím nepodařilo odstranit. Poté, co by se podařilo odstranit chybu v souřadnicových systémech jednotlivých datových souborů lze konstatovat, že výsledná batymetrie v měřeném příčném profilu by byla pro oba způsoby měření téměř totožná.

Přínosem této práce je především fakt, že se podařilo prokázat, že měření batymetrie pomocí echosounderu udává věrohodné výsledky, na základě kterých lze provádět analýzy stavu nádrží.

Při srovnání batymetrie získané pomocí echosounderu v roce 2014 a 2015 byl zjištěn nárůst objemu sedimentu v nádrži o cca 1472,2 m³. Při přezkoumání prostorového rozložení sedimentů se potvrdilo možné snížení objemu nádrže, a to zejména v západní části, kde do nádrže natékají potoky.

Výsledky této práce budou přínosem pro další měření v rámci grantu IGA pod názvem 20154242 – Batymetrie soustavy malých vodních nádrží (MVN) na povodí Šárecko-Litovického potoka, přičemž tento má návaznost na grant TAČR TA 04020042 –(2014-2017) Nové technologie batymetrie vodních toků a MVN pro srovnání jejich zásobních kapacit a sledování množství a dynamiky sedimentů.

12. Literatura a použité zdroje

1. **AGRC (ArcGIS Resoure Center), 2011:** How Kriging works. Online: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000076000000.htm>, cit. 16. 01. 2015
2. **BARGAVA N., BHARGAVA R., TANWAR P. S., 2012:** Deriving point and line buffer rendering in GIS. *International Journal of Computer Applications in Engineering, Technology and Science*, ročník 4/1, s. 270 - 273.
3. **BARGAVA N., BHARGAVA R., TANWAR P. S., 2013:** Triangulated irregular network model from mass points. *International journal of advanced computer research*, ročník 3/2, s. 172 – 176.
4. **BAŠTA P., 2008:** Diplomová práce: Digitální model terénu povodí Modrava 2. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 137 s.
5. **BERGOUSE R., REIS E., 2015:** Reconstructing pre-erosion topography using spatial interpolation techniques: A validation-based approach. Center for Geographical Studies, University of Lisbon, Portugal, Science Press and Springer-Verlag.
6. **BOOKSTEIN F. L., 1989:** Principal wraps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11, 6/1989, s. 567-585.
7. **BURIAN J., 2008:** Vyznáte se v interpolacích? *GeoBusiness* 11: 40 – 41.
8. **BURROUGH P. A., 1986:** Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press.
9. **BURROUGH P. A., MCDONNELL R. A., 1998:** Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford.
10. **ČSN 75 2410, 1997:** Stokové sítě a kanalizační přípojky. Český normalizační institut, Praha, 37 s.
11. **DIBAVOD, 2015:** Oddělení geografických informačních systémů a kartografie, Praha. Online: <http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&PHPS ESSID=a99b61cefd21e6d164552fd394e9e854/>, cit. 16. 02. 2015.

12. **DOUŠEK F., MATĚJÍK M., 2005:** Geodézie. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 309 s.
13. **ELONEN J., 2005:** Thin Plate Spline editor - an example program in C++. online: <http://elonen.iki.fi/code/tpsdemo/index.html>, cit. 16 .01. 2015.
14. **ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, GWINN R.P., NORTON P.B., GOETZ P.W., 1987:** The New Encyclopædia Britannica. Micropaedia and Macropaedia, Chicago.
15. **ERDEM H., 2013:** RiverSurveyor S5 / M9 System Manual. SonTek, San Diego, 154 s.
16. **ESRI, 2007:** How inverse distance weighted (IDW) interpolation works. Online:http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=How_Inverse_Distance_Weighted_%28IDW%29_interpolation_works, cit. 19. 02. 2015.
17. **ESRI, 2008:** Natural Neighbor interpolation. Online: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Natural%20Neighbor%20Interpolation>, cit. 25. 03. 2015.
18. **DANSON E., 2006:** Understanding lidar bathymetry shallow waters and coastal mapping. XXIII. International congress TS19 Hydrography. Online: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Understanding+LiDAR+Bathymetry+for+Shallow+Waters+and+Coastal+Mapping#0>, cit. 15. 01. 2015
19. **DEKKER A. G., et al. 2011:** Intercomparasion of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australia and Caribbean coastal environments. Limnologic Oceanographic methods, Vol. 9, s. 396 – 425.
20. **DELICADO P., GIRALDO R., COMAS C., MATEU J., 2010:** Statistic for spatial functional data: some recent contributions. Environmetrics. Ročník. 21/3-4, s. 224 – 239.
21. **DIERSSEN H. M., 2010:** Perspective on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate. Proceedings of the National academy of sciences.

22. **DIERSSEN H. M., THEBERGE A. E., 2011:** Bathymetry: Assessing Methods. Encyclopedia of natural resources, 25s.
23. **DIERSSEN H. M., THEBERGE A. E., 2012:** Encyclopedia of Ocean Sciences, Taylor and Francis, New York, NY.
24. **HANJIANGA X., LIMINA T., LONGA S., 2008:** A strategy to build a seamless Multi-scale TIN-DEM database. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, ročník 37/B4.
25. **HAXBY W. F., KARNER G. D., LABRECQUE J. L., WEISSEL J. K., 1983:** Digital images of combined oceanic and continental data sets and their use in tectonic studies, Eos Trans. Am. Geophys. Un., 64, s. 995-1004.
26. **HEINE G. W., 1986:** A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods. COGS Computer Contributions, ročník. 3/2. s. 60–72.
27. **HOMOLA V., 2004:** Sylaby geostatistiky a geoinformatiky. Doc. Dr. Vladimír Homola, PhD., Online. <http://homel.vsb.cz/~hom50/>, cit. 16. 02. 2015.
28. **HORÁK J., 2002:** Úvod do geostatistiky a interpolace prostorových dat. Syllabus pro účastníkov seminára Geostatistika, Ostrava, s. 42.
29. **HUTCHINSON, M. F., DOWLING T. I., 1991:** A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. Hydrological Processes 5, s 45–58.
30. **HUTCHINSON M. F., 1996:** A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. Proceedings of the Third International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Barbara, California: National Center for Geographic Information and Analysis. Methodology. CRC Press, Florida.
31. **HUTCHINSON M. F., GALLANT J. C. 2000:** Digital elevation models and representation of terrain shape. In: J.P. Wilson and J.C. Gallant (eds) Terrain Analysis. Wiley, New York, s. 29–50.
32. **CHAMOUT L., SKÁLA P., 2003:** Základy geodézie. Česká zemědělská univerzita, 131 s.

33. **CHILDS C., 2004:** Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. ESRI Education Services 3: 32 – 35.
34. **JOHNSTON K., VER-HOEF J. M., KRIVORUCHKO K., LUCAS N., 2001:** Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI.
35. **JOURDIN F., TESSIER C., HIR P., VERNEY R., LUVEN M., LOYER S., LUSVEN, A., et al. 2014:** Dual-frequency ADCPs measuring turbidity. Geo-Marine 34/2014, s. 381 – 397.
36. **KLIMÁNEK 2006:** Digitální modely terénu. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 85 s.
37. **KOČICKÝ D., 2006:** Parametrizácia hydrologických procesov v distribuovanom modelovaní odtoku. Zborník GIS vo vodnom hospodárstve, Slovenská asociácia pre geoinformatiku, Katedra geodetických základov a Katedra vodného hospodárstva krajiny SVF STU v Bratislave.
38. **KRAUS J., 2007:** Geostatistika jako prostorové modelování statistických jevů. Statistika 6: 490 – 502.
39. **KUMLER, M. P., 1990:** Thiessen's Remarkable Polygons. California Geographer [online]. 1999, roč. 39, s. 71-80, cit. 25. 03. 2015.
40. **LAROCQUE P. E., WEST G. R., 1990:** Airborne Laser Hydrography: An Introduction. ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea Area and Red Sea, Kuwait City.
41. **LESY HL. M. PRAHY, 2015:** Rybník Strnad. Online: <http://www.lhmp.cz/vt/prazske-nadrze-2/prazske-rybniky/rybnik-strnad/>, cit. 18. 01. 2015.
42. **LESY HL. M. PRAHY, 2015:** Litovicko-Šárecký potok. Online: <http://www.lhmp.cz/vt/prazske-potoky-2/litovicko-sarecky-potok/>, cit. 18. 01. 2015.
43. **LYZINGA D. R., 1987:** Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. Applied optics, Vol. 17, s. 379 – 383.
44. **MANDAL R. V., KAMAL J., 2008:** Digital elevation model accuracy aspects. Journal of applied sciences 8, s. 134 – 139.

45. **MCBRATNEY A. B., WEBSTER R., 1986:** Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science* 37, s. 617–639.
46. **MCCOY J., JOHNSTON K., KOPP S., BORUP B., WILLISON J., PAYNE B., 2001:** Using ArcGIS Spatial Analyst. ESRI.
47. **MOORE I. D., GRAYSON R. B., LADSON A. R., 1991:** Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. *Hydrological Processes*, Vol.5, s. 3 – 30.
48. **NEVOSÁD Z., VITÁSEK J., 2000:** Geodézie. Vysoké učení technické v Brně, VUTIUM, Brno, 140 s.
49. **OLIVER, M. A., 1990:** Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." *International Journal of Geographic Information Systems* 4, s. 313–332.
50. **ORŠULÁK T., PACINA J., 2010:** Inovace geograficky orientovaných studijních oborů s cílem zvýšit míru uplatnění absolventů na trhu práce. Centrum digitálních služeb MINO, Ústí nad Labem.
51. **PANIGRAHY N., JAIN S. K., KUMAR V., BHUNYA P. K., 2009:** Algorithms for Computerized Estimation of Thiessen Weights. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 2009, roč. 23, č. 4, s. 239-247, cit. 25. 03. 2015.
52. **PEUCKER T. K., FOWLER R. J., LITTLE J. J., MARK D. M., 1978:** The Triangulated irregular network. *American society of photogrammetry proc.*, Digital terrain models symposium, ročník 516, s. 532.
53. **PRESS W. H., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T., FLANNERY B.P., 1988:** Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press.
54. **QUADROS N. D., COLLIER P. A., 2008:** Fraser integration of bathymetric and topographic lidar. Preliminary investigation, Beijing.
55. **REICHL J., 2015:** Encyklopedie fyziky. Online: <http://fyzika.jreichl.com//>, cit. 18. 12. 2014.

56. **SANDWELL D. T., 1984:** A detailed view of the South Pacific geoid from satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, 89(B2), 1089-1104.
57. **SIBSON R., 1981:** A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpolating multivariate data*, John Wiley and Sons, New York, s. 21-36.
58. **SMITH W., SANDWELL D., 2004:** Conventional bathymetry bathymetry from space and Geodetic altimetry. *Oceanography*, Vol. 17, 1/2014, s. 8-23.
59. **ŠÁLEK J., MIKA Z., TRESOVÁ A., 1989:** *Rybníky a účelové nádrže*. Nakladatelství technické literatury, Praha, 267 s.
60. **SCHEER., 1999:** Uplatnenie metód geoštatistiky pri zisťovaní stavu lesa. *Acta Facultatis Forestalis*. XLI, Zvolen, s. 239–251.
61. **ŠIMONIDES I., 2006:** *Základy geografických informačných systémov*. 3.vyd. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 114 s.
62. **TLAPÁK V., HERYNEK J., 2002:** *Malé vodní nádrže*. Mendelejova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 200 s.
63. **TRESOVÁ A., 1978:** *Rybníky a účelové nádrže*. SVŠT, Bratislava, 194 s.
64. **VRÁNA K., 1998:** *Rybníky a účelové nádrže*. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 150 s.
65. **VRÁNA K., BERAN J., 2013:** *Rybníky a účelové nádrže*. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 150 s.
66. **Vyhláška č. 294/2005 Sb.** o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/201 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady v platném znění.
67. **WAHBA G. 1990:** *Spline models for Observational data*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Philadelphia.
68. **WATSON D., 1992:** *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Pergamon Press, London.
69. **WHOI (Woods hole Oceanographic institution), 2010:** *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*. Online: <https://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=819>, cit. 18. 01. 2015.

70. **WOZENCRAFT J., MILLAR D., 2005:** Airborne lidar and intergrated technologies for coastal mapping and nautical charging. Marine technology society journal, Vol. 39, s. 27 – 35.
71. **ZHILIN L., QING Z., GOLD CH., 2005:** Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press, Boca Raton, 300 s.

13. Seznam obrázků

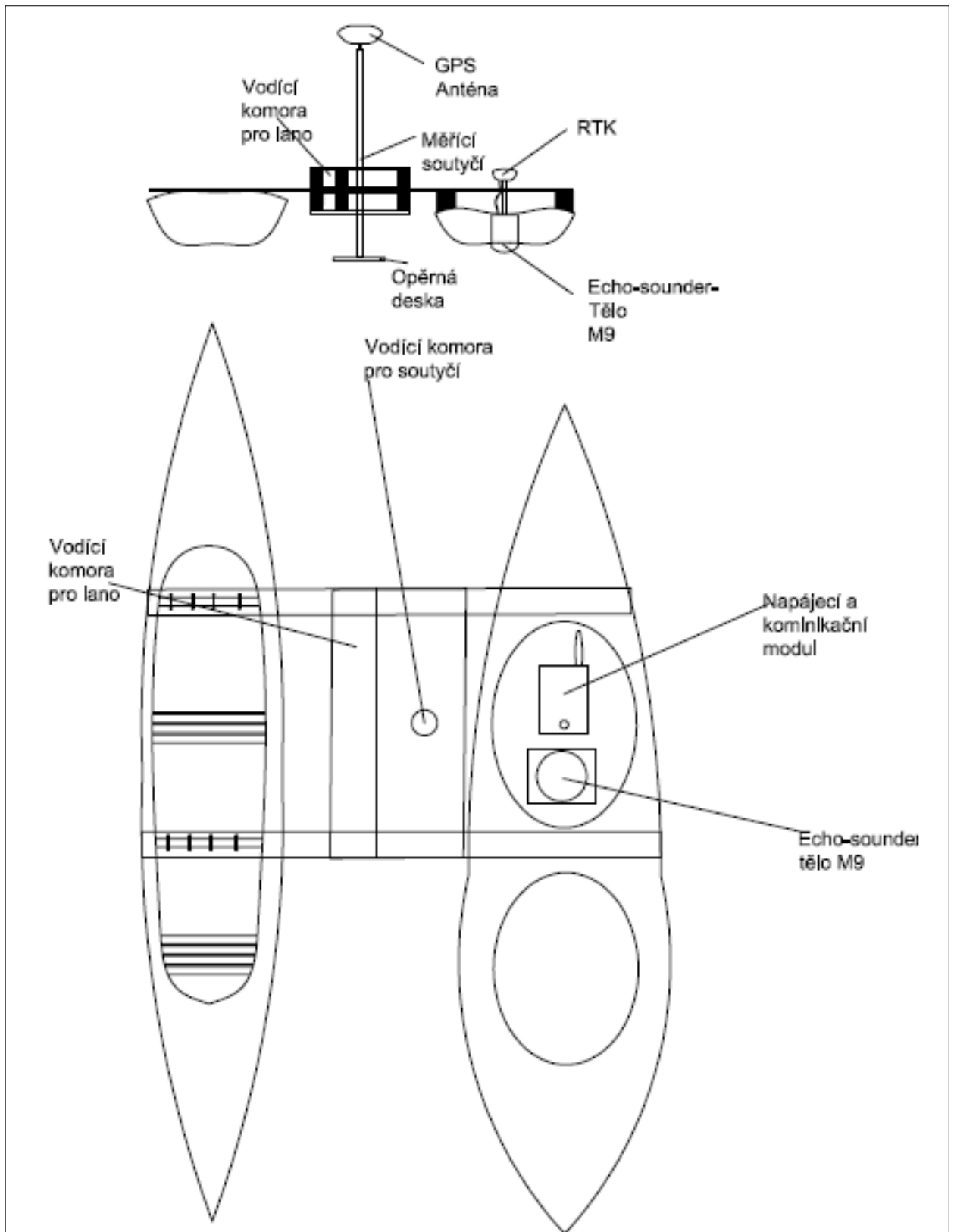
Obrázek 1: Dělení nádrží dle přítoku	15
Obrázek 2: Princip tachymetrie.....	20
Obrázek 3: Porovnání jedno a více paprscitých sonarů (Dierssen et Theberge, 2011)	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 4: Princip Dopplerova jevu (Dierssen et Theberge, 2011)	23
Obrázek 5: Princip metody LIDAR (LaRocque et West, 1990).....	27
Obrázek 6: Princip satelitního měření výšek (Dierssen et Theberge, 2011).....	28
Obrázek 7: Princip metody Natural Neighbor (ESRI, 2008)	31
Obrázek 8: Změna váhy bodu se změnou vzdálenosti u rozdílných parametrů p (ESRI, 2007).	32
Obrázek 9: Porovnání IDW (vpravo) a SPLINE (ESRI, 2007)	34
Obrázek 10: Propojení dvojic bodů (AGRC, 2011).....	38
Obrázek 11: Empirický semivariogram (AGRC, 2011)	39
Obrázek 12: Semivariogram (AGRC, 2011).....	40
Obrázek 13: Sférický model simivariogramu (AGRC, 2011)	41
Obrázek 14: Exponenciální model semivariogramu (AGRC, 2011)	41
Obrázek 15: Model simivariogramu (AGRC, 2011).....	42
Obrázek 16: Metody strukturování výškových dat (Moore et al., 1991).....	44
Obrázek 17: Delauneyho triangulace (Bargava et al., 2013)	46
Obrázek 18: Povodí Litovecko-Šáreckého potoka (Dibavod, 2015)	48
Obrázek 19: MVN Strnad (vlastní)	49
Obrázek 20: Síly působící na těleso v tekutině (Reichel, 2015)	52
Obrázek 21: Soulodí (uprostřed středové konstrukce lze vidět měřící soutyčí) (vlastní)	54
Obrázek 22: Měření referenčních dat (vlastní)	56
Obrázek 23: Srovnání jednotlivých měření.....	64

Obrázek 24: Regresní přímka - Soutyčí x Bottom-track.....	65
Obrázek 25: Regresní přímka - Soutyčí x Vertical beam	65
Obrázek 26: Regresní přímka - Vertical beam x Bottom-track	66
Obrázek 27: Porovnání DTM nádrže a zobrazení naměřených bodů. 07/2014 a 03/2005.....	68
Obrázek 28: Porovnání DTM nádrže 07/2014 a 03/2005	69

14. Seznam tabulek

Tabulka 1: Objem sedimentů v MVN ČR (tis. m ³) (Vrána et Beran, 2013).....	17
Tabulka 2: Srovnání korelačních koeficientů mezi jednotlivými datovými soubory	64

15. Přílohy



Příloha 1: Nákres měřícího soulodí (vlastní)



Příloha 2: Měřičská skupina při získávání dat (vlastní)



Příloha 3: Měřicí loď s namontovaným přístrojem RiverSurveyor (vlastní)



Příloha 4: Měřící soulodí (vlastní).



Příloha 5: Měřící přístroje. V popředí RTK k RiverSurveyor (vlastní)



Příloha 6: Měřící tým při kalibraci přístroje RiverSurveyou (vlastní)



Příloha 7: Měřící soutyč (vlastní)



Příloha 9: Detail šroubu k uchycení GPS přijímače a převlečné spojky (vlastní)



Příloha 8: Detail spojení jednotlivých dílů soutyčí (vlastní)