

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování



Možnosti využití nových metod batymetrie vodních
nádrží

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Radek Roub, Ph.D.

Diplomant: Bc. Františka Kundratová

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Františka Kundratová

Krajinné inženýrství

Název práce

Možnosti využití nových metod batymetrie vodních nádrží

Název anglicky

Possibilities of use of new bathymetry method of water reservoirs

Cíle práce

Hlavním cílem práce bude posoudit novou metodu měření hloubek leteckým laserovým skenováním v podmínkách České republiky. Dále vytvořit digitální model terénu (DMT) ze zaměřených bodových dat vybraných úseků VD Hracholusky a řeky Vltavy a následně ho porovnat s DMT vytvořeným z kontrolních (sonarových) dat. A konečně bude cílem vyhodnocení potenciálu nové metody batymetrie pro mapování v podmínkách ČR.

V rámci literární rešerše bude cílem přiblížit danou problematiku – popsat vývoj batymetrie, dále přiblížit metody sběru batymetrických dat.

Metodika

V teoretické části bude popsán vývoj batymetrických metod a možnosti jejich využití. Dále budou přiblíženy pojmy DMT, batymetrická mapa a interpolace terénu. Dále budou popsány vybrané lokality VD Hracholusky a úsek řeky Vltavy. Bude přiblížena metodika sběru a zpracování lidarových a kontrolních (sonarových) dat.

V praktické části budou zaměřená data zpracována v programu ArcGIS a výsledné DMT budou vyhodnoceny. DMT vzniklé z lidarových dat bude porovnáno s DMT ze sonarových dat a bude posouzena přesnost měření hloubek leteckým laserovým skenováním.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran + grafické přílohy

Klíčová slova

batymetrie, letecké laserové skenování, lidar, VD Hracholusky, Vltava

Doporučené zdroje informací

- Carter J., Schmid K., Waters K., Betzhold L., Hadley B., Mataosky R., Halleran J., 2012: Lidar 101: An introduction to lidar technology, data and applications. NOAA Coastal services center, Charleston, 72 s
- Mandlburger G., Pfennigbauer M., Steinbacher F., Pfeifer N., 2011: Airborne hydrographic lidar mapping – potential of a new technique for capturing shallow water bodies. 19th International Congress on Modelling and Simulation (12. – 16.12.2011), Perth, 7 s.
- Novák P., Roub R., Vybíral T., Hlaváček J., Hejduk T., Bureš L., Reil A., 2015: Nové technologie batymetrie vodních toků a nádrží. Vodní hospodářství 65: 13 – 20
- Steinbacher F., Pfennigbauer M., Aufleger M., Ullrich A., 2012: High resolution airborne shallow water mapping. International society for photogrammetry and remote sensing 39: 55 – 60

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Radek Roub, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2017

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Radka Rouba, Ph.D., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 17.4.2017

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Roubovi, Ph.D., za odborné vedení, vstřícný přístup a věnovaný čas při zpracování práce. Dále děkuji Ing. Václavu Hradilkovi za poskytnuté rady a věnovaný čas. Poděkování patří rovněž mým rodičům za trpělivost a podporu během studia.

V Praze dne 17.4.2017

Abstrakt

Pravidelné měření hloubek vodních toků, nádrží, rybníků a jezer je potřeba z mnoha důvodů, ať už pro hydrologické modelování, mapování biotopů, monitoring splaveninového režimu nebo mapování topografie dna pro archeologické účely. Z toho důvodu dochází k rozvoji vědního oboru batymetrie pro potřeby mapování mělkých vod a objevují se stále přesnější metody. Snahou je najít ve všech ohledech výhodnější způsob měření, aby se minimalizovaly časové i finanční náklady měření a zvýšila se přesnost. V současné době je v České republice patrně nejrozšířenější metodou měření hloubek pomocí ADCP zařízení, což je sice velmi přesná metoda, nicméně stále časově náročná. Letecké laserové skenování s využitím vlnové délky 532 nm v rozsahu zeleného záření má naproti tomu velký potenciál pro měření hloubek v mělkých vodách.

Tato diplomová práce se zabývá využitím leteckého laserového skenování pro potřeby batymetrie vodních nádrží a toků v podmínkách České republiky. V literární rešerši jsou popsány metody, jak lze batymetrická data získat a principy jejich fungování. Vlastní práce se zabývá využitím leteckého laserového skenování pro sběr batymetrických dat. Pomocí laserového skeneru Riegl VQ-880-G byly zaměřeny hloubky na vybraném úseku řeky Vltavy a VD Hracholusky. Ze zaměřených dat jsou vytvořeny digitální modely terénu. Následně jsou porovnány s digitálními modely terénu, které byly vytvořeny ze srovnávacích sonarových dat. Výsledky jsou prezentovány formou mapových výstupů v příloze. Cílem práce je zjistit potenciál leteckého laserového skenování pro batymetrické účely v podmínkách ČR a ověřit jeho přesnost. Tato metoda by mohla být velmi přínosnou pro měření mělkých vod, neboť šetří čas i ekonomické náklady.

Klíčová slova: batymetrie, letecké laserové skenování, lidar, VD Hracholusky, Vltava

Abstract

It is essential to measure water depths of rivers, water reservoirs, ponds and lakes from various reasons like hydrologic modeling, monitoring of biotopes, monitoring of sediments or archeologic researches. Hence, the bathymetry techniques for measurements of shallow waters are still evolving. The goal is to find the best method allowing fast and economic mapping of large-scale areas and providing high-resolution data. Currently, the most common method in Czech Republic is probably depth measurement by an ADCP devices, which is a very accurate method, but still time-consuming. On the other hand, airborne laser scanning with wavelength of 532 nm (green laser pulse) has a great potential for shallow water mapping.

This work is focused on the possibilities of use of the airborne laser scanning for bathymetry of rivers and water reservoirs in conditions typical for Czech Republic. The methods of obtaining the bathymetric data are discussed in theoretical part, as well as principles of its operation. In the practical part, two study areas (a part of Vltava river and a Hracholusky dam) were scanned using the laser scanner Riegl VQ-880- G. Digital terrain model (DEM) was created from acquired data of the two study areas. After that the DEMs were compared with DEMs which were created from sonar data. The results of comparison are presented. The aim of this work is to assess the ability of airborne laser bathymetry in conditions typical for Czech Republic and verify the accuracy of this method. This method saves time and economic costs and it has great potential to be usable for future research.

Keywords: bathymetry, airborne laser scanning, lidar, Hracholusky dam, Vltava river

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Cíle práce	12
3.	Literární rešerše	13
3.1	Vymezení pojmu batymetrie	13
3.2	Historický vývoj vědního oboru batymetrie	13
3.3	Mapování vodních ploch	14
3.3.1	Mapování břehové čáry	14
3.3.2	Měření hloubek olovnicí	14
3.3.3	Sonary	16
3.3.4	Letecké laserové skenování	24
3.4	Zpracování dat z lidarového měření	31
3.4.1	Digitální model terénu	32
3.4.2	Batymetrická mapa	33
3.4.3	Interpolační metody	33
4.	Charakteristika vybraných lokalit	36
4.1	Vodní dílo Hracholusky	36
4.2	Vltava v úseku v Hluboké nad Vltavou	37
5.	Metodika	40
5.1	Kontrolní (sonarová) data	40
5.1.1	Metodika sběru kontrolních dat	40
5.1.2	Zpracování kontrolních dat	41
5.2	Lidarová data	44
5.2.1	Metodika sběru lidarových dat	44
5.2.2	Zpracování lidarových dat	47
6.	Výsledky	49
6.1	Hracholusky	49
6.2	Vltava	55
7.	Diskuze	58

8.	Závěr	62
9.	Přehled literatury a použitých zdrojů	64
10.	Přílohy	72

1. Úvod

Voda ovlivňuje naše životy od počátků vývoje lidstva, je základním prvkem životního prostředí. Představuje pro nás životní potřebu, ale také hrozbu.

V našich podmínkách je potřeba přizpůsobovat přirozený rozkolísaný režim průtoků velmi značná. Česká republika (ČR) se nachází na střeše Evropy – většina řek u nás pramení, avšak řeky se stávají vydatnými až mimo naše hranice. Hospodaření s vodou v ČR je vázané na existenci vodních nádrží. Vodní díla (VD) se u nás tradičně budují již od 13. století, kdy docházelo k pozvolnému rozvoji rybníkářství (Broža [ed], 2011). Hlavním smyslem výstavby přehrad je akumulace vody, regulace vodního režimu v řekách a ochrana před povodněmi i obdobími sucha. Vodní nádrže plní několik funkcí, z toho hlavní funkce jsou zásobní a ochranná. Zásobní funkce se uplatňuje zejména při suchých obdobích. Ochranná funkce je zajištěna horním prostorem v nádrži, který se udržuje prázdný. Slouží pro zachycení povodňové vlny a zmírňuje tak škody na toku pod přehradou. Během toho jsou v nádrži zachyceny také splaveniny. Víceúčelová vodní díla jsou složitá a nákladná stavby a měly by mít dlouholetou životnost. Zajištění dlouhodobé spolehlivosti a udržitelnosti všech žádaných funkcí vyžaduje trvalou a kvalitní péči. Ta spočívá ve fungující obsluze, manipulaci s vodou, plánovitě údržbě zaměřené na předcházení poruch a rychlého opotřebování konstrukce (Broža, 2005). Jedním ze zkoumaných problémů je zanášení nádrží. K zanášení dochází vlivem eroze v povodí nad nádrží, vlivem abraze břehů v samotné nádrži a abraze v toku nad nádrží. Působením těchto vlivů vznikají splaveniny. Pokud je splaveninový režim toku vysoký, dochází k zanášení nádrží velmi intenzivně, což snižuje akumulační prostor nádrže a omezuje činnost objektů v nádrži (Patera, 2002). Aby bylo možné těmto problémům předcházet, je nutné sledovat celkový stav nádrží a jejich zanášení. V ideálním případě pak kontrolovat akumulační objem nádrže a stav dna v pravidelných intervalech. Na to poukazyval již koncem 19. století Dr. P. Wagner při svých batymetrických výzkumech šumavských jezer, za účelem zjištění rychlosti zanášení (Šobr, 2003). Přesto je u nás monitoring usazování splavenin v nádržích stále opomíjen a celkové množství sedimentu je stále hrubý odhad (Hradilek a kol, 2015).

Měřením hloubek se zabývá vědní obor batymetrie. V dnešní době je možné získávat batymetrická data efektivněji a přesněji než kdy dřív (Hradilek a kol, 2015). Existují ověřené a spolehlivé metody, které se neustále vyvíjí. Ovšem aby bylo možné provádět opakovaná měření v krátkých časových rozmezích, je nutné minimalizovat časové i finanční náklady takového měření (Steinbacher a kol, 2012). V počátcích

batymetrických průzkumů se využívalo jednopaprscitých sonarů (tzv. echosounderů). V současnosti je pro potřeby mapování v ČR patrně nejrozšířenější metodou sonarové měření pomocí přístrojů ADCP. Jde o velmi přesnou metodu, která je mnohem efektivnější než měření hloubky olovnicí spuštěnou z lodi, ale stále je to časově náročné (Hradilek a kol, 2015). Navíc některá místa nemusí být pro sonary dostupná. Tyto problémy by mohly být vyřešeny pomocí metody leteckého laserového skenování. Letecké laserové skenování již dnes dokazuje svou užitečnost zejména při pozemním mapování. Nicméně při tom se využívá lidarů s infračerveným zářením, které neproniká do vodního sloupce a odráží se od vodní hladiny. To je vhodné například pro zjištění břehové linie či zpřesnění sítě vodních toků, nikoli pro měření hloubek. K tomu slouží lidary, které využívají zelenomodré záření (Dolanský, 2004). Jsou dnes již hojně využívány pro měření v oceánech, kde dosahují hloubek až 60 m a úspěšně nahrazují akustické metody (Carter a kol, 2012). Přesto laserové skenery pro měření v mělkých vodách jsou teprve na vzestupu (Steinbacher a kol, 2012). Cílem této práce je právě ověřit potenciál takového měření v prostředí ČR. Na dvou vybraných lokalitách, VD Hracholusky a úseku řeky Vltavy, byla zaměřená batymetrická data laserovým skenerem Riegl VQ-880-G. Jedná se o jeden z nejmodernějších laserových skenerů současnosti, který je primárně určený pro měření v mělkých vodách. Pomocí softwarového programu ArcGIS jsou vytvořeny digitální modely terénu obou lokalit. Následně jsou porovnány s digitálními modely terénu vytvořenými na základě dat získaných srovnávacím sonarovým měřením. Z dosažených výsledků je vyhodnocen potenciál metody leteckého laserového skenování pro potřeby batymetrie v České republice.

2. Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je posoudit metodu měření hloubek vodních toků a nádrží leteckým laserovým skenováním v podmínkách České republiky. Ze zaměřených dat vytvořit digitální modely terénu pro dvě zájmové lokality – VD Hracholusky a úsek řeky Vltavy a následně je porovnat s digitálními modely terénu vytvořenými z kontrolních sonarových dat. Z dosažených výsledků bude dále vyhodnocen potenciál této metody pro její budoucí užívání.

V rámci literární rešerše je cílem diplomové práce seznámit s vývojem vědního oboru batymetrie a s metodami sběru batymetrických dat. Dále blíže přiblížit měření hloubek sonary a lidary a některé pojmy, jako digitální model terénu, batymetrická mapa a interpolace terénu.

3. Literární rešerše

3.1 Vymezení pojmu batymetrie

Batymetrie je vědní disciplína, která se zabývá měřením hloubek ve vodě. Historicky je tento pojem synonymem pro měření hloubek v oceánech, ale za poslední století obsáhl také měření hloubek sladkovodních ploch (Steinberg, 2009). Název batymetrie vychází z řeckých slov bathus – metrein a znamená měření hloubek (Pokorná, 2006).

3.2 Historický vývoj vědního oboru batymetrie

První důkazy o lidské snaze měřit hloubku pochází z období přibližně 1800 př. n. l. ze starověkého Egypta. Jedná se o malby a řezby, které byly nalezeny v hrobce archeologické lokality Deir al-Bahri v Egyptě (Soule, 1976 in Theberge, 1989). Jiná vyobrazení zobrazovaly muže, kteří se snaží zjistit hloubku pomocí provázku se závažím (Theberge, 1989).

První psaná zmínka pochází z doby přibližně 4. století př. n. l. Řecký historik Herodotos zmiňuje změření hloubky 66 stop (přibližně 20 m) na řece Nilu, což dokazuje zájem také o měření sladkovodních ploch. Posidonius, řecký vědec, spustil měřící lano do Středozemního moře přibližně 100 let př. n. l. (Soule, 1976 in Theberge, 1989). Tyto zmínky jsou na dlouhou dobu jedinými záznamy o snaze měřit hloubku vody (Theberge, 1989).

V průběhu středověku docházelo k pokroku pozvolna. Za zmínku stojí rok 1584, kdy holandský kartograf Lucas Jans Waghenaer publikuje atlas Spiegel der Zeevaert, který zobrazuje jedny z prvních námořních map se skutečnými hloubkami (Theberge, 1989). Tato publikace sloužila hlavně pro námořní navigaci. V roce 1773 kapitán Constantine John Phipps spustil měřící lano se závažím v Norském moři a změřil hloubku 683 sáhů (Deacon [ed], 1962).

Počátky batymetrických měření v Čechách jsou zřejmě pokusy o měření hloubek šumavských jezer, které probíhaly v 16. století za Rožmberků a 18. století za Schwarzbergů, výsledky se ovšem nedají pokládat za relevantní. Průkopníkem systematické a komplexní batymetrie v ČR byl Dr. P. Wagner, který koncem 19. století vykreslil na základě vlastních měření mapy všech šumavských jezer (kromě Malého Javorského jezera) v měřítku 1: 5000 (Šobr, 2003). Na něj navazuje počátkem 20. století výzkum profesora Karlovy univerzity Václava Švambery, který systematicky zmapoval všech osm šumavských jezer a provedl výzkum fyzikálních vlastností vody (Jánský a Šobr, 2003).

3.3 Mapování vodních ploch

Metody mapování vodních ploch se neustále vyvíjí. Je to dáno požadavky na stále přesnější údaje, ať už pro sledování zanášení nádrží, pro výzkum ekologických stanovišť v mělkých vodách nebo pro hydrologické modelování povodní na řekách. Prvotní metoda pro měření hloubek využívala olovnici připevněnou na provazu či měrné tyče a ruční vykreslování batymetrických map. Potřeba přesnějších a rychlejších metod vedla k vývoji sonarových měření a nakonec i k využívání dálkového průzkumu pomocí lidarů (Dierssen a Theberge, 2014).

3.3.1 Mapování břehové čáry

Před začátkem samotného batymetrického měření, je potřeba zmapovat břehovou linii, což je možné několika způsoby. Starší a pracnější metodou je ortogonální metoda, která spočívá v mapování pomocí teodolitu pro měření úhlů a pásma pro měření délek. Následně se ručně nebo pomocí geodetického programu vykresluje půdorysný plán vodní plochy. Tato metoda je nahrazována totální stanicí, což umožňuje počítačové zpracování a modelování výsledků (Jánský a Šobr, 2003; Česák a Šobr, 2005). A nakonec lze k mapování břehové čáry využít metody dálkového průzkumu země, jako je fotogrammetrie nebo letecké laserové skenování a následně pomocí softwarových programů digitalizovat letecké snímky. Fotogrammetrie je pasivní metoda dálkového průzkumu, je tedy závislá na atmosférických vlivech. Sběr dat je možný jen při denním světle a jasném počasí bez oblačnosti. A navíc potřebuje místo na zemském povrchu snímat ze dvou různých poloh, aby mohl vzniknout stereoskopický snímek. Mapování břehové čáry touto metodou rovněž ztěžuje hustá vegetace v okolí vodní plochy, která zabraňuje určení přesných souřadnic. U leteckého laserového skenování závisí hlavně na volbě laseru, pro mapování břehové linie se využívají lasery s vlnovou délkou v rozsahu infračerveného záření (Baltsavias, 1999; Dolanský, 2004).

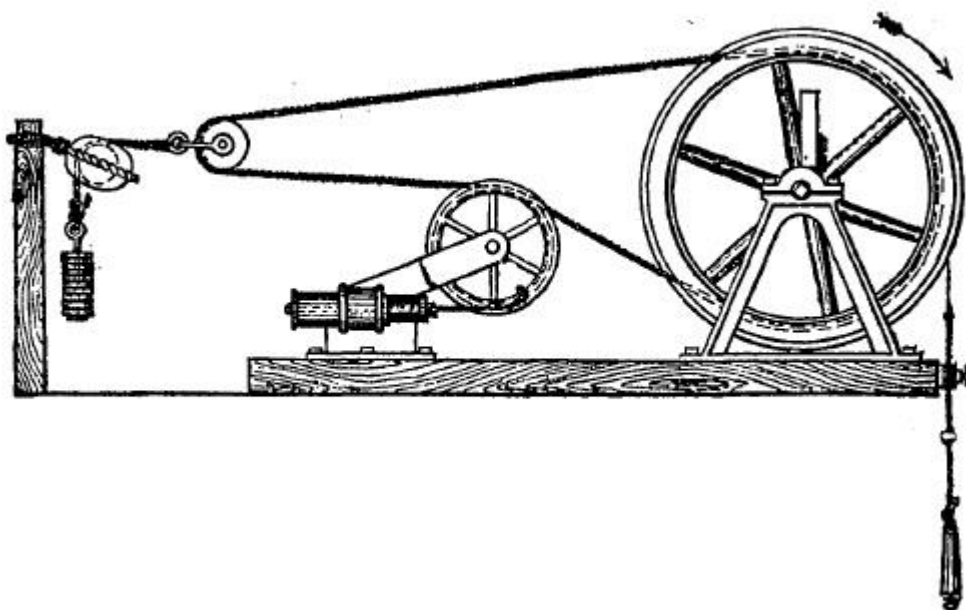
3.3.2 Měření hloubek olovnici

Nejstarší metoda měření hloubek spočívá ve spuštění olovnice nebo závaží na dno vodní plochy a odečtením dané hloubky.

Přibližně v období jednoho století před naším letopočtem byla ve Středomoří úspěšně změřena hloubka větší než jedna míle (Theberge, 1989). Jak tato měření byla přesná, můžeme pouze odhadovat. Vynálezy mechanických technologií pro měření hloubek usnadnily další měření (Theberge, 1989). V průběhu 19. století se Charles Wilkes neúspěšně pokusil nahradit lano měděným drátem (Stanton, 1975 in

Theberge, 1989). Roku 1840 sir James Clark Ross provedl hlubokomořské měření na otevřeném oceánu v jižním Atlantiku. Naměřil 2425 sáhů (skoro 4500 m). Novým impulsem pro měření hloubek oceánu byly snahy položit podmořský telegrafický kabel v polovině 19. století (Deacon [ed], 1962). Matthew Fontaine Maury, americký oceánograf, publikuje první batymetrickou mapu severního Atlantského oceánu. Avšak některé údaje jsou chybné, mapa obsahuje chybějící prvky i prvky navíc (Theberge, 1989).

V roce 1872 vynalezl William Thomson (později lord Kelvin) přístroj užívající speciální ocelový drát malého průměru, který se využíval pro výrobu klavírních strun (Agassiz, 1888). Tento vynález až třikrát urychlil dosavadní měření hloubek (Dierssen a Theberge, 2014). Poručík Charles D. Sigsbee upravil a zdokonalil Thomsonův stroj a provedl výzkum Mexického zálivu, jehož výsledkem byla první moderní batymetrická mapa (Theberge, 1989).



Obrázek 1. Thomsonovo zařízení pro měření hloubek (Theberge, 1989).

Dalším přístrojem, který je nutno zmínit je Tannerovo měřicí zařízení. Je určen pro měření v mělkých vodách (Theberge, 1989; Tanner, 1903). Měřicí přístroje se vyvíjely dalších padesát let. Bylo pomocí nich objeveno velké množství příkopů, hřebenů a svahů, které známe dnes, včetně Mariánského příkopu (Theberge, 1989).

Harrison (1972) popisuje podrobněji měření hloubek pomocí olůvka v proudící vodě. Poukazuje, že měření touto metodou může být zatíženo velkými chybami. Některým chybám lze předejít správným výběrem materiálu pro měření. Olůvko musí

být zavěšeno na ohebném, ale neroztažitelném materiálu. Pokud se jedná o nylonové lanko, mělo by mít v jádru ocelový drátek, aby nedocházelo k protažení lanka při zatížení. Olůvko je limitováno vahou, pro pohodlné ruční ovládaní je vhodné do 5 kg. Pokud se vyvarujeme těmto chybám, poté hlavní chyby jsou způsobeny převážně průhybem lanka vlivem působení proudící vody. Proto výsledná hloubka zjištěná z lanka bude vždy větší než skutečná hloubka (Harrison, 1972).

U nás měření olovnicí v praxi provedl počátkem 20. století prof. Švampera. Jak bylo zmíněno výše, systematicky zmapoval šumavská jezera. Půdorysná měření provedl pomocí teodolitu či speciálního úhloměru a hloubková měření provedl tak, že spouštěl závaží na ocelovém lanku ze sondovacího zařízení. Přes hladinu napjal ocelový drát, vyznačil na něm značky po deseti metrech a závaží spouštěl ke dnu vždy nad každou značkou. Další měření proběhla až po devadesáti letech, kdy již bylo možno využít modernější technologie. Půdorysné měření bylo provedeno pomocí pásma a teodolitu a hloubkové měření pomocí jednopaprscitého sonaru, tzv. echolotu. Během vyměřování je nutno vyznačit na břehové linii body, ze kterých se šňůrou vytyčily profily, podél nichž se pohyboval člun s echolotem a měřil hloubku v místě na nich vyznačených značek (Šobr, 2003).

Metody měření hloubek pomocí olovnice nebo závaží jsou celkem přesné, ale časově náročné (Česák a Šobr, 2005). Později je nahrazují akustické metody měření hloubek (Elhassan, 2015).

3.3.3 Sonary

V současné době se k měření hloubek nejčastěji používají sonary. Sonar (z angl. Sound Navigaion And Ranging) je zařízení, které využívání akustických vln k navigaci a zaměřování objektů pod vodou nebo k měření hloubek (Novák a kol, 2015). Sonary se dělí na dva základní typy, pasivní a aktivní. Pasivní sonary jsou zařízení, která pouze poslouchají a zaznamenávají zvuky vydávané objekty ve vodě. Využívají se pro jiné než batymetrické účely, např. detekce seismické činnosti. Aktivní sonary jsou zařízení vydávající zvukové vlny o specifických frekvencích a zaznamenávající signál (echo), který se vrací zpět. Jsou vhodné pro batymetrické měření hloubek (SeaBeam, 2000).

Počátky zvukové navigace mají původ v myšlence, že zvuk je slyšitelný nejen ve vzduchu, ale i pod vodou. Ve skutečnosti jsou zvuky slyšitelné ve vodním prostředí ještě lépe, než ve vzduchu. Schopnost vody vést zvuky ve velkých vzdálenostech umožňuje dálkový průzkum ve vodě. Aristoteles byl pravděpodobně první, kdo si uvědomil, že zvuk je slyšitelný pod vodou. Navazovaly pokusy Leonard da Vinciho,

který umístil do vody trubku a druhý konec přiložil k uchu. Takto bylo možné slyšet blížící se lodě (Theberge, 1989).

Další vývoj ovlivnil katastrofický náraz Titaniku do ledovce, který vyvolal pokusy o vytvoření zařízení pro detekování ledovců. V roce 1913 si německý fyzik Alexander Behm patentoval echo-sounding. Technologie se ukázala jako nevhodná pro pozorování ledovců, ale projevila se jako vhodný nástroj pro měření hloubek. V roce 1916 byla Behmem úspěšně testována (Wille, 2005; Salous, 2013). Dalším byl kanadský inženýr Reginald Fessenden. V roce 1914 představil tzv. Fessendenův oscilátor, který byl schopen měřit hloubku i detekovat ledovce (Wille, 2005). V následujících letech probíhal rychlý vývoj těchto technologií. Roku 1916 Paul Langevin ve spolupráci s Constantinem Chilowskym uvedl první detektor podmořských objektů, který je založený na principu piezoelektrického jevu krystalů křemene. Zároveň na tomto problému také pracovali Britové, pod vedením Roberta Boyle (Manbachi a Cobbold, 2011). V roce 1922 byla vytvořena první batymetrická mapa, založená pouze na echo-soundingu (Nelson, 1982 in Theberge, 1989).

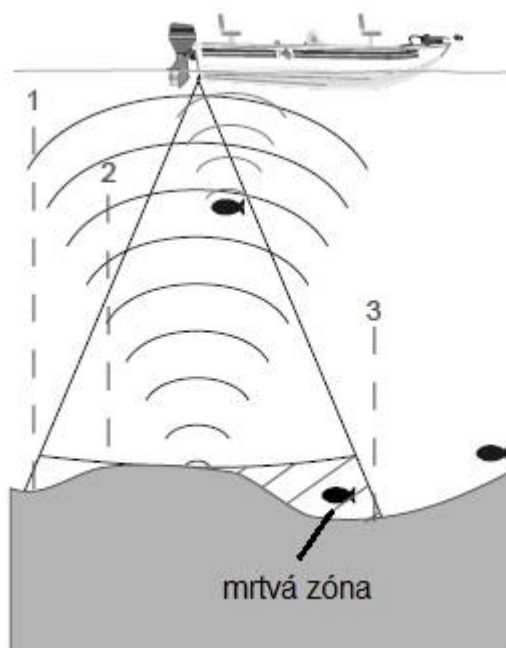
Sonarovým měřením byla prozkoumána velká území dna oceánů a moří, přispělo k odhalení středooceánských hřbetů a poklesů, i k rozvinutí teorie pohybu litosférických desek (Pokorná, 2006). Stávající technologie se však stále zlepšují a vyvíjí se nové, přesnější a rychlejší metody, jako je letecké laserové skenování (Theberge, 1989).

3.3.3.1 Jednopaprscitý sonar (Single-beam echosounder)

Základní možností při sonarovém měření je jednopaprscitý sonar, tzv. echolot či echosounder. Sonda (transducer) vysílá vlnění ve tvaru kónického kuželu (Novák a kol, 2015). Jakmile vlna narazí na dno, rybu nebo jiný objekt, je odrazena zpět. Sonda přijímá odražené signály, posílá je do přístroje, ten je zpracovává a zobrazuje na displeji v podobě grafu (Garmin, 2000). Frekvence vlnění je 50 – 200 kHz a úhel záběru paprsku je od 10° do 40°. Při nižších frekvencích (50 kHz) je úhel záběru paprsku větší (asi 40°), což umožňuje pozorovat větší oblasti dna, avšak s menší přesností. Pro mělké vody je vhodnější využít větší záběr paprsku a pro hlubší užší záběr paprsku. Největší přesnost pro měření hloubky je dosažena při vyšších frekvencích (asi 200 kHz), kdy je úhel rozevření asi 10°. Některé sonary umožňují zvolení duální frekvence. Výsledná hodnota hloubky je vypočtena ze dvou měření a je přesnější (Česák a Šobr, 2005). V případě, že to nelze, je nejvýhodnější nastavit úhel rozevření 20°, což je kompromis, který je možno využít pro všechny hloubky (Novák a kol, 2015).

Jednopaprscitý sonar je určen pro měření z lodi, která je v pohybu (SeaBeam, 2000). Echoloty jsou vhodné pro měření hloubek od 0,4 m do 200 m. Přesnost měření je závislá na typu přístroje a hloubce vody. Čím větší hloubka, tím menší přesnost. U hloubek do 50 m je přesnost do 10 cm. Echolot není vhodný pro místa mělčí než 0,4 m nebo pro jezera a nádrže, kde je dno porostlé vegetací, neboť se signál od ní odráží. V těchto situacích je nutné metodu kombinovat s jiným měřením, např. ručním (Česák a Šobr, 2005).

Jednopaprscitý sonar je jednoduché a levné zařízení, které je určené především pro rybáře na hledání ryb. Není vhodný pro rozsáhlé batymetrické průzkumy, protože využívá pouze jeden paprsek. Jak je patrné z obr. 2, pokud se zvukové vlny odrazí od nějaké překážky, vše pod touto překážkou zůstane nezaměřeno, tedy např. odrazí-li se od povrchu dna, které je položeno výše, pak vše pod touto úrovní zůstane v mrtvé zóně a údaj se nezobrazí na displeji (Garmin, 2000). Navíc jednopaprscité sonary neposkytují dostatečně podrobnou informaci o vlastnostech dna (SeaBeam, 2000). Tyto nevýhody vedly k rozvinutí technologií mnohopaprscitého sonaru.



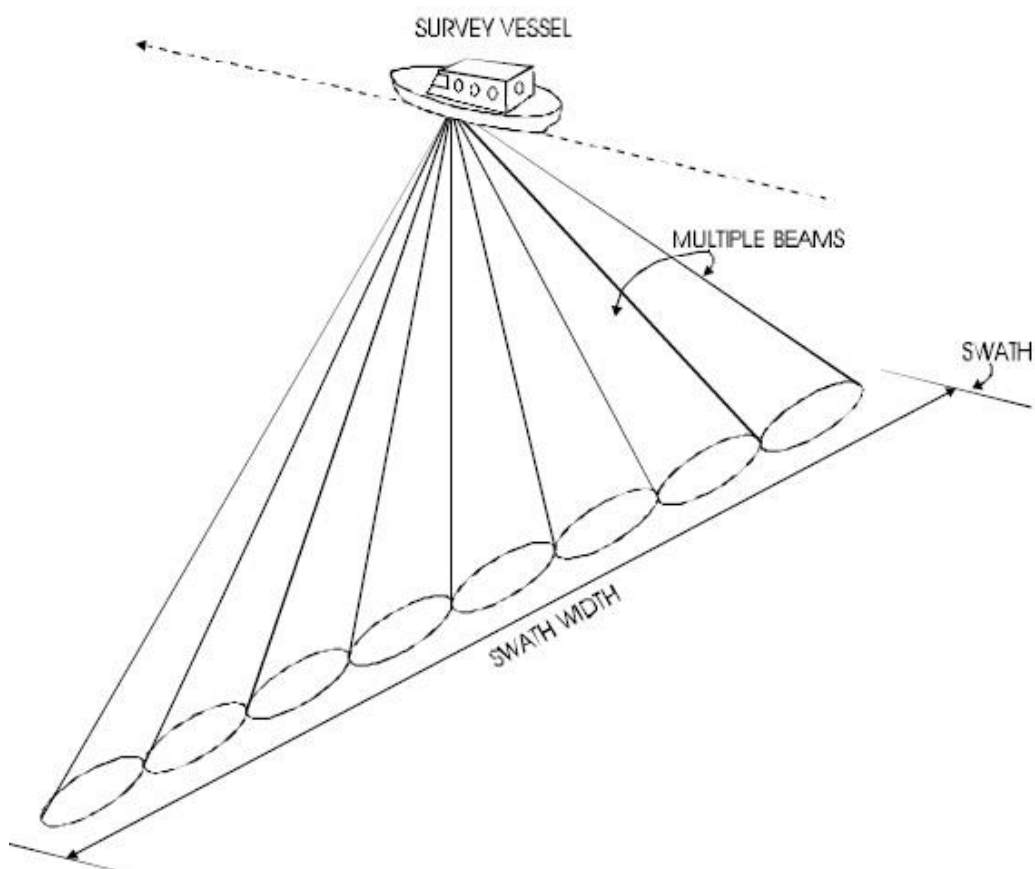
Obrázek 2. Schéma principu jednopaprscitého sonaru (Garmin, 2000).

3.3.3.2 Mnohopaprscitý sonar (Multibeam echosounder)

Další variantou je mnohopaprscitý sonar. Tato technologie vznikala na počátku 60. let 20. století, původně pro vojenské účely. V roce 1964 si společnost SeaBeam Instrument (tehdy General Instrument) patentovala technologii mnohopaprscitého sonaru. První systém využívající tuto technologii byl vyvinut pro americké námořnictvo a je znám jako Sonar Array Sounding System (SASS). SASS využívá

dvě oddělené uskupení sonarů umístěné kolmo na sebe, jednu pro vyslání a druhou pro příjem signálu. Toto uspořádání se nazývá Mills Cross Array (SeaBeam, 2000).

Rozdíl oproti jednopaprscitému spočívá v tom, že je schopen zmapovat více než jednu lokalitu na povrchu dna (Novák a kol, 2015). Tyto lokality jsou uspořádány tak, aby mapovali souvislou oblast dna, obvykle bodový pás kolmý na směr pohybu plavidla (SeaBeam, 2000). Tato oblast se nazývá swath, neboli pokos (Novák a kol, 2015). Obr. 3 zobrazuje schéma principu mnohopaprscitého sonaru – ze zařízení vychází více paprsků do odlišných míst dna (SeaBeam, 2000).



Obrázek 3. Schéma principu mnohopaprscitého sonaru (SeaBeam, 2000).

Mnohopaprscitý sonar je mnohem komplexnější, ale také dražší, než jednopaprscitý sonar. Avšak tyto náklady jsou vyváženy zredukováním operační doby. Umožňuje mapovat dno ve vysokém rozlišení a menším čase, což také efektivně snižuje náklady na mapování. Tato technologie nachází uplatnění hlavně při hluboko oceánských výzkumech. Dokáže mapovat desítky kilometrů široká a několik kilometrů hluboká území (SeaBeam, 2000).

3.3.3.3 Boční sonar (Sidescan Sonar)

Na rozdíl od předchozích sonarů, boční sonar neměří hloubku, ale zobrazuje informace o skladbě dna. Využívá toho, že různé materiály mají odlišnou schopnost pohlcování a odrazení zvuku. Například kovy nebo nově vzniklé sopečné horniny odráží zvuk velmi dobře, na rozdíl od jílu a naplavených sedimentů. Čím lépe materiál zvuk odráží, tím silnější je signál, který se vrací zpět. Díky těmto znalostem lze využít sílu vracejícího se signálu k určení složení dna. Boční sonar v podstatě slouží k vyhodnocování síly odrazu vyslaných zvukových pulzů. Kombinací bočního sonaru s mnohopaprscitým sonarem získáme podrobnou informaci o tvaru a složení mořského dna (SeaBeam, 2000, Novák a kol., 2015).

3.3.3.4 Výložníkový systém

Další ze způsobů měření hloubky je tzv. výložníkový systém, který provozuje Povodí Vltava. Jedná se o speciální vyměřovací loď Valentýna. Plavidlo je určeno k měření hloubek na vodních tocích, kontrolám toků po průchodu velkých vod a vyhledávání plavebních překážek na vodních cestách. Pro účely měření hloubky je loď vybavena výložníky, na které jsou umístěna ultrazvuková měřící čidla (PV, 2013). Manipulace s výložníky je zajištěna hydraulicky. Ultrazvuková aparatura MD 300 měří na frekvenci 100 kHz a je využívána od roku 1999. Určení v prostoru zajišťuje systém GPS s přijímačem na plavidle a na břehu (přesnost polohy 0,25 m) (Pokorná, 2006). Měření doplňují radiolimnigrafy (výška hladiny), inklinometr (koriguje chyby vzniklé náklonem lodi) a gyrokompas (navigace lodi při měření) (Pokorná, 2006; Novák a kol., 2015). Data slouží správcům vodních toků při údržbě vodních cest, lze je rovněž využít k projekčním pracím při matematickém modelování. Loď lze dále využít ke kontrolnímu měření po průchodu velkých vod a při vyhledávání různých překážek na dně řeky (Pokorná, 2006).

Valentýna je primárně určena k měření na labsko-vltavské vodní cestě (PV, 2013). Je vhodná pro hloubky od 0,6 do 200 m (Pokorná, 2006). Pro měření na nádržích, jezerech, rybnících či vodních toků je k dispozici měřící člun Joska, který lze přemísťovat na vleku za osobním automobilem (PV, 2013c).

3.3.3.5 Parasound

Sonary, určené ke zkoumání mořského dna, jako jsou mnohopaprscité sonary, jsou schopny přijímat informaci o hloubce a tvaru mořského dna. Neposkytují však informaci o stratifikaci sedimentů ani o objektech zahrabaných ve dně. Vzhledem k tomu, že útlum elastické vlny je mnohem vyšší v sedimentech než ve vodě, vlny o

relativně vysokých frekvencích nejsou schopny proniknout do spodních sedimentů. Vlny o relativně nízkých frekvencích se mohou šířit hlouběji (Kozaczka a kol, 2010).

Princip parasoundu obecně spočívá v tom, že dvě či více vln o relativně vysokých frekvencích (100 – 115 kHz) jsou odeslány zároveň (Lekkerkerk a Theijs [eds], 2011). Frekvence těchto vln je dostatečně vysoká, aby vyprodukovala tzv. sekundární vlny, včetně vlny, jejíž frekvence je rovná rozdílu frekvencí primárních vln. Vzniklá vlna výhodně kombinuje vlastnosti primárních vln (Kozaczka a kol, 2010), jako je užší paprsek o nízké frekvenci (4 – 15 kHz), dobré průnikové schopnosti s vysokým rozlišením a přesné měření hloubky díky paprskům o vysokých frekvencích. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost a fyzikální omezení vody. Hloubka průniku se pohybuje v rozmezí 5 – 50 m (Lekkerkerk a Theijs [eds], 2011) a závisí na geoakustických vlastnostech sedimentů dna (Kozaczka a kol, 2010).

Zařízení, vytvářející vlny na základě parametrického principu, umožňuje zvýšení možností výzkumu stratifikace mořského dna a hledání objektů v něm, což může být objektem zájmu zejména archeologů, vojenství či ropného průmyslu (Kozaczka a kol, 2010).

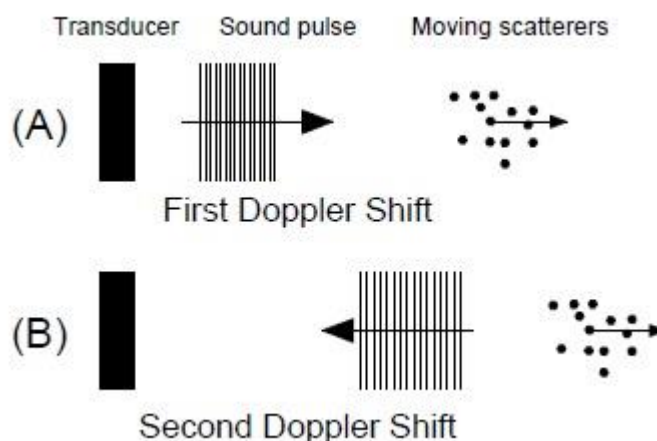
3.3.3.6 ADCP (Acoustic Doppler current profiler)

Acoustic Doppler profiler nebo také Acoustic Doppler current profiler je znám pod zkratkou ADCP. Jedná se o zařízení, které měří rychlost proudu vody v různých rozsazích (hloubkách), využívající Dopplerův efekt zvukových vln. Lze jej použít ve sladkých i slaných vodách pro vědecké účely, jako předpovědi počasí, biologické studie živin, ekologické studie odpadních vod či zjišťování přírodních zdrojů, včetně ropy (Gordon, 1996).

Přístroj měří rychlost pohybu vody v rámci celého vodního sloupce. Principem ADCP je měření vodního proudu pomocí zvukových vln. Využívá jevu zvaný Dopplerův efekt - zvuková vlna má vyšší frekvenci, když se přibližuje, než když se vzdaluje (WHOI, 2014). Přístroj vlastně vydává zvuk o známé frekvenci a naslouchá změnám ve vracející se frekvenci (Emery a Thompson, 1998).

ADCP vysílá do vody zvukové signály o konstantní frekvenci. Signál se odráží od částic rozptýlených ve vodě a vrací se zpět do zařízení. Díky Dopplerovu jevu mají zvukové vlny, které jsou odražené od částic pohybujících se směrem od přístroje, při návratu o něco nižší frekvenci. Částice, jež se pohybují k přístroji, vysílají zpět signál o vyšší frekvencích. Rozdíl ve frekvencích vln vyslaných a přijatých se nazývá Dopplerův posun (obr. 4). Díky tomu je zařízení schopno vypočítat, jak rychle se částice a voda okolo ní pohybují. Zvukové vlně, která narazila na částici vzdálenou

od přístroje, tedy trvá návrat delší čas, než vlně, které narazila na částici v blízkosti přístroje. Díky změření času potřebného zvukové vlně pro návrat a Dopplerovu posunu je přístroj schopen měřit rychlost proudu v několika rozdílných hloubkách v každé sérii vyslání signálu (Gordon, 1996; WHOI, 2014).



Obrázek 4. Schéma principu Dopplerova jevu, který je založený na Dopplerově posunu (Gordon, 1996).

ADCP zařízení mohou být ukotvena na dně, pak dokáží měřit rychlost vody v pravidelných intervalech ode dna až k hladině. Pokud je umístěno vodorovně např. na hrázi nebo mostních pilířích ve vodním toku, tak slouží ke zjištění profilu dna. Pokud je umístěno na pohybující se lodi, musí směřovat dolů a měří též rychlost proudění vody. V hlubokých vodách může být umístěno níže pod loď (WHOI, 2014; Novák a kol, 2015). Může být též umístěno na plovánu, jako je tomu u zařízení RiverSurveyor S5 či M9 americké firmy SonTek (obr. 5). Při měření příčných profilů musí být plovák plynule přetahován po vodní hladině pomocí lanka, tak aby byl změřen požadovaný profil. Jeden pracovník tahá plovák k sobě a druhý po stejné ose zase zpět (Novák a kol, 2015; SonTek, 2015).



Obrázek 5. SonTek Hydroboard II – Plovák (SonTek, 2015).

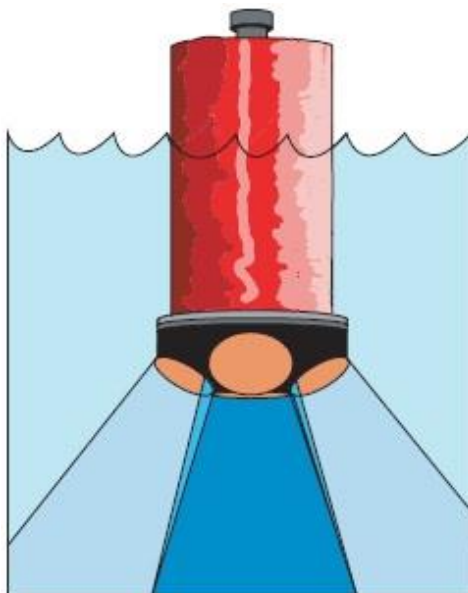
V závislosti na umístění zařízení je potřeba následující vybavení. Pro umístění na dně je třeba kotva, baterie a interní záznam dat. Při umístění na lodi je třeba mít vlastní pohon, lodní počítač pro příjem dat a GPS navigaci. Dále software pro manipulaci s daty (WHOI, 2014; Novák a kol, 2015).

Jednou z nevýhod ADCP je to, že vysokofrekvenční vlny přináší přesnější data, ale nejsou schopny proniknout do větších hloubek. Naproti tomu nízkofrekvenční vlny se ve vodě dokáží dostat hlouběji. Je tedy nutné učinit kompromis, mezi maximální hloubkou, do které jsme schopni měřit a přesností měření (WHOI, 2014). Mezi další nevýhody patří např. vznik bublin během turbulentního proudění, který způsobuje nepřesnosti v měření (Gordon, 1996), nespolehlivost dat při měření v příliš čistých vodách s nedostatečným množstvím částic (Mueller a Wagner, 2009) či nízká výdrž baterie (WHOI, 2014).

První generace těchto zařízení byly tzv. úzkopásmové ADCP, které vysílají pouze jeden paprsek během jednoho měření. Konfigurace a obsluha je jednodušší, ale jsou méně přesné (Mueller a Wagner, 2009). Později byly nahrazeny širokopásmovými ADCP, které poskytují vyšší přesnost měření. Širší paprsek umožňuje více informací pro odhad rychlosti. Mohou také vysílat několik paprsků, čímž je umožněno získávat data ve třech dimenzích (Gordon, 1996).

ADCP jsou pro svou spolehlivost a účinnost široce uznávaným a vyhledávaným prostředkem pro poskytování přesných hydrologických dat, což potvrdil např. Morlock (1996) a jsou běžně používány mnoha organizacemi a agenturami pro měření průtoků ve vnitrozemských vodních dílech, vodních tocích, jezích a ústích řek (Obergruber a Mueller, 1994; Parsons a kol, 2012). Praktický příklad použití ADCP při měření na malé řece uvádí např. Gunawan a kol (2010), na malé vodní nádrži např. Hradilek a

kol (2015). Využitelnost zařízení ADCP pro průzkum sedimentů diskutuje např. Jourdin a kol (2014) a Guerrero a kol (2016). Další podrobné informace o principech Dopplerova jevu a použití ADCP zařízení udává např. Gordon (1996), Simpson (2001) a Mueller a Wagner (2009).



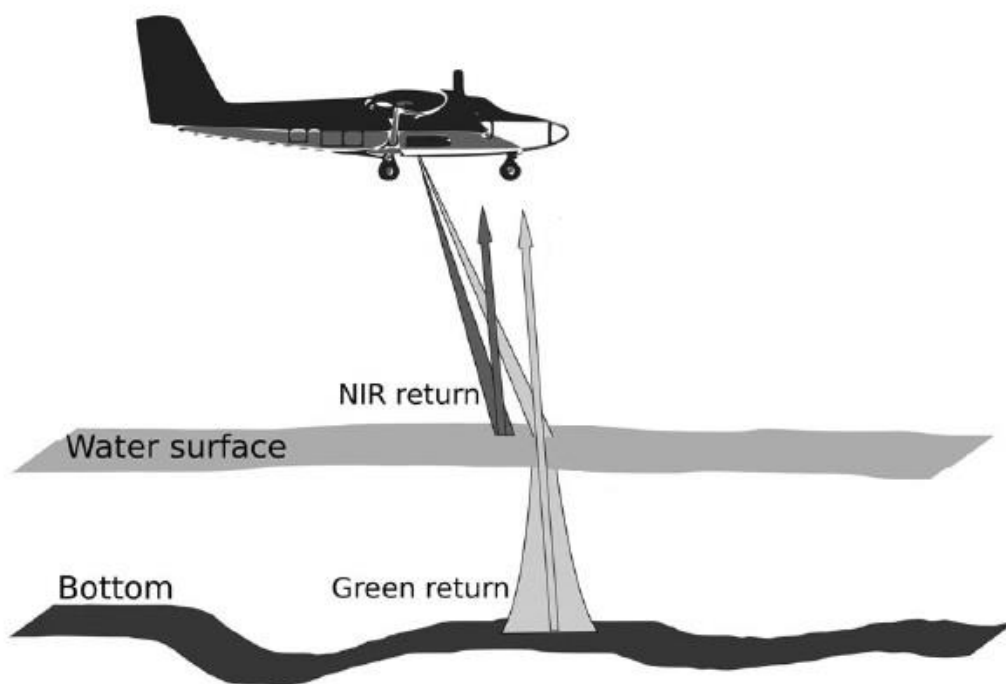
Obrázek 6. Typické ADCP zařízení. Pokud je pevně instalováno (namontováno na lodi), vždy směřuje směrem dolů (Simpson, 2001).

3.3.4 Letecké laserové skenování

Pro technologii leteckého laserového skenování se hojně používá pojem lidar. Lidar (z angl. Light Detection and Ranging) je technologie k detekci objektů a k měření vzdáleností (Dolanský, 2004) nebo též aktivní metoda dálkového průzkumu země, která zprostředkovává 3D mapování objektů ve velmi vysokém rozlišení (Pan a kol, 2015). Jedná se o poměrně mladou a stále se rozvíjející technologii, která slibuje rychlé pokroky a zdokonalování možností jejího využití (Dolanský, 2004).

Ekvivalentním pojmem pro lidar je laserový skener. Principem lidaru je měření vzdálenosti pomocí laserového paprsku, mapování zemského povrchu z letadla. Přístroj obsahuje zdroj laserového záření, optickou soustavu, mechanický prvek, detektor elektromagnetického záření a přesné hodiny (Dolanský, 2004). Lidary jsou využívány v mnoha oborech, pro mapování zemského povrchu, mapování koncentrací polutantů (např. Fiala a kol., 2000), archeologické mapování (např. Gojda a kol, 2011), měření oblačnosti, měření rychlosti projíždějících vozidel či pro vojenské účely (Dolanský, 2004). Více o leteckém laserovém skenování a technologii lidarů uvádí např. Dolanský (2004) a Carter a kol (2012).

Většina laserových jednotek používá vlnovou délku v rozsahu infračerveného záření (1100 – 1200 nm). Vlastnosti povrchu udávají intenzitu odraženého světla. Infračervené světlo je však pohlcováno vodou, proto se pro batymetrické účely používá zelenomodré záření (400 – 600 nm). Tato část spektra má lepší vlastnosti pro měření pod vodní hladinou. Pokud je cílem zmapovat např. břehovou linii nebo záplavovou čáru při povodních, pak je vhodné použít lidar s vlnovou délkou v rozsahu infračerveného záření. V současnosti lze pro mapování pobřežních vod využít duálního použití infračerveného a současně zelenomodrého záření. Jedná se o systém DIAL (z angl. Different Absorption Lidar). Vlastní princip duálního lidaru spočívá v tom, že laserový vysílač vysílá laserové pulzy, které směřují k hranici vody a vzduchu, kde se část energie odrazí zpět do přijímače. Zbytek energie prochází do vodního sloupce a odrazí se ode dna. Hloubka vody pochází přímo z časové prodlevy mezi odraženým signálem od povrchu vody a ode dna vody (Irish a Lillycrop, 1999). Infračervené záření se odráží od zemského povrchu a od vodní hladiny a mapuje vodní hladinu a modrozelené záření ve stejném okamžiku mapuje dno (Dolanský, 2004). Schéma principu duálního lidaru zobrazuje obr 7.



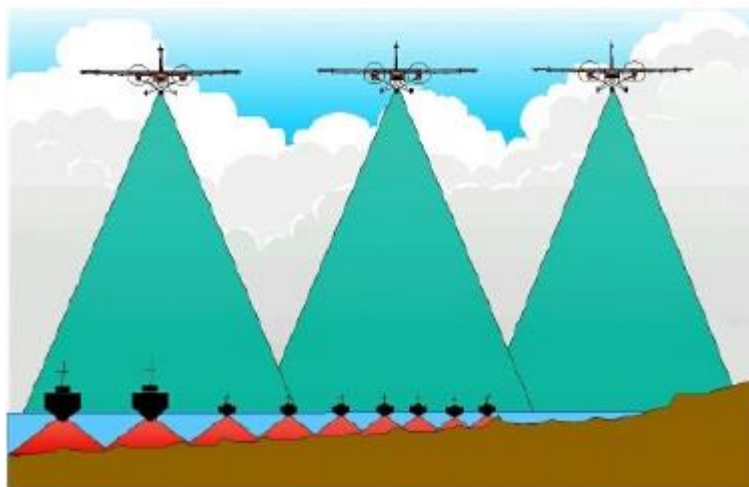
Obrázek 7. Zjednodušené schéma zobrazující princip duálního lidaru (Allouis a kol, 2010).

Koncept využití lidarů v batymetrii pochází již z počátku 60. let 20. století a úspěšný vývoj prvních batymetrických systémů započal v 70. letech v USA, Kanadě a Austrálii. Na přelomu tisíciletí byly na světě 3 plně funkční letecké lidarové batymetrické

systémy: SHOALS (USA), LADS (Australia) a Hawk Eye (Švédsko) (Irish a Lillycrop, 1999). V současnosti se využívají pro batymetrii např. duální lidary Chiroptera II a HawkEye III švédské firmy AHAB, která je od roku 2013 součástí švýcarské společnosti Leica Geosystems (Leica Geosystems, 2017), dále systémy CZMIL Nova, Titan či SHOALS 3000 kanadské firmy Teledyne Optech (TO, 2017) a Riegl VQ-880-G rakouské firmy Riegl (Riegl, 2016). Dále jsou v dnešní době k dispozici lidary, které disponují pouze zeleným zářením o jedné vlnové délce 532 nm. Z takových lze jmenovat např. Riegl VQ-820-G firmy Riegl (pro topo-batymetrické mapování kompatibilní s Riegl LMS Q680i) (Riegl, 2015), Aquarius firmy Teledyne Optech (pro topo-batymetrické mapování kompatibilní s Gemini) (Optech, 2011), LADS Mk3, jež je produktem původně australské společnosti LADS, dnes součástí nizozemské společnosti Fugro (Fugro, 2017). Dále EAARL-B, kterým disponuje NASA, a který poskytuje informace pro průzkum korálových útesů (USGS, 2016). Velmi dobré srovnání některých jmenovaných typů lidarů uvádí např. Fernandez-Diaz a kol (2014) či Quadros (2013), jehož srovnání je uvedeno v příloze na obr. 30 a 31. Všechny výše uvedené systémy jsou z roku 2010 a mladší. Dále je třeba zmínit ještě duální lidar SHOALS 1000T, který byl uveden v roce 2005 a stal se prvním komerčním batymetrickým lidarem. Jeho parametry jsou stále více méně srovnatelné se současnými technologiemi. Avšak systém SHOALS byl vyvinut firmou Optech a doručen US Army Corps of Engineers (USACE) pro batymetrické účely již v roce 1994 (Optech, 2012). Více o batymetrických lidarech SHOALS je uvedeno např. v (Irish a Lillycrop, 1999; Irish a kol, 2000 nebo Guenther a kol, 2000)

Konvenční laserové skenery určené pro hlubinnou batymetrii se vyznačují cílem proniknout tak hluboko, jak je možné a zároveň eliminovat vliv mořských vln (Pfennigbauer a kol, 2010). Jedná se o komplexnější zařízení, které jsou větší a těžší než topografické lidary. Z toho vyplývá, že potřebují větší letadlo, a tedy mají větší pořizovací i provozní náklady. Navíc jsou nepraktické pro potřebu mapování mělkých vod (Fernandez-Diaz a kol, 2014). Přesto je tato metoda přesná, schopná a ekonomicky výhodná v místech, kde není umožněn bezpečný sonarový průzkum (obr. 8), avšak nenahrazuje sonary. Hlavním limitujícím faktorem je čírost vody. Obecně se maximální měřitelný rozsah hloubek pohybuje od více než padesáti metrů ve velmi čistých vodách a méně než deseti ve velmi kalných. V extrémně kalných vodách nemusí být měření vůbec možné (Guenther a kol, 2000). Firma Teledyne Optech v současnosti udává maximální hloubku 60 – 80 m (TO, 2017). Další nevýhodou je nízké prostorové rozlišení, které není tak dobré, jako u moderních

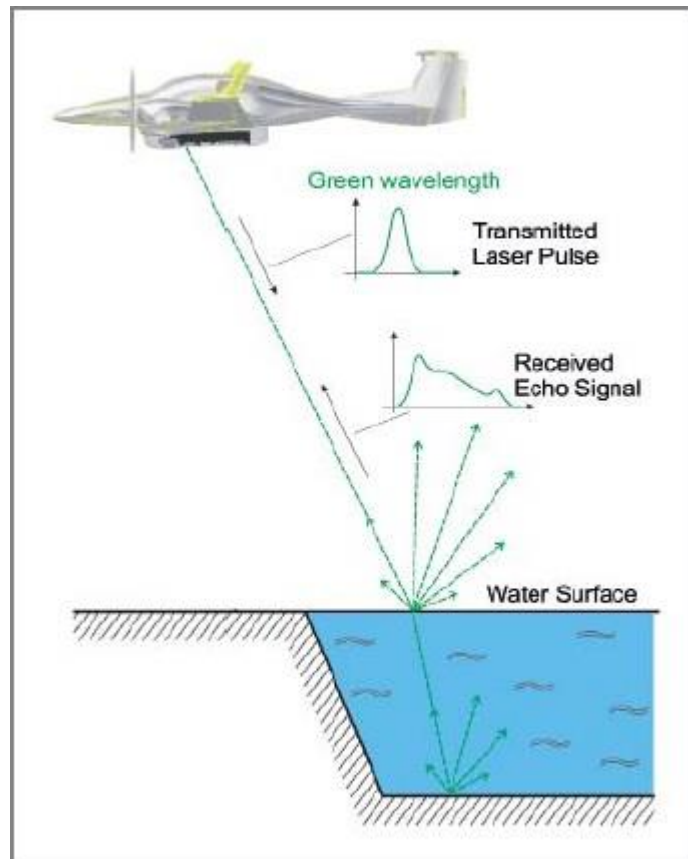
vysokofrekvenčních sonarů a hrozí riziko, že malé objekty na dně (menší než 1 m³) nebudou zmapovány (Guenther a kol, 2000).



Obrázek 8. Porovnání efektivity sonarového a lidarového měření (Guenther a kol, 2000).

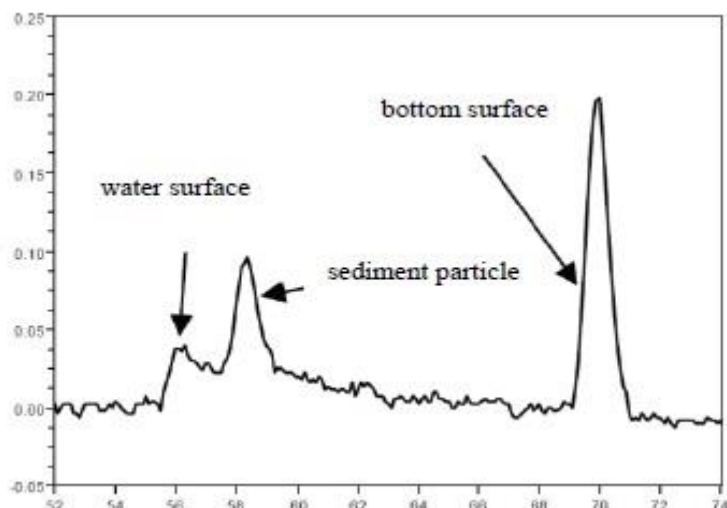
V současnosti se pozornost vědců obrací spíše na vývoj lidarových sensorů, které by umožnily výzkum mělkých vod, jako jsou malé vodní toky, mokřady, údolní nivy, ústí řek, záplavová území či pobřežní zóny. Mapování těchto oblastí může být stěžejní pro výzkumy v oblasti ekologie či pro predikci povodňových událostí (Steinbacher a kol, 2012; Richardson a Moskal, 2014). Hilldale a Raff (2008) provedli výzkum amerických řek Yakima a Trinity. Data byla zaměřena systémem SHOALS 1000T. Došli k závěru, že v té době a s dostupnou technologií není možné uspokojivě mapovat poříční oblasti v mikroměřítku. V batymetrii v té době převažuje zájem o dosažení co největší hloubky, nikoli větší přesnosti a poukázali na nutnost dalšího výzkumu.

Jak bylo zmíněno výše, laserové skenery pro hlubinnou batymetrii (až 80 m) jsou nepraktické pro přesné měření v mělkých vodách (okolo 10 m). Navíc, aby se překonal útlum signálu ve vodním sloupci a maximalizovala pravděpodobnost zachycení odrazu ode dna, je vyžadována relativně vysoká energie. Tato energetická náročnost je uspokojena užitím dlouhotrvajících širších paprsků a nízké pulsni opakovací frekvence (PRF - pulse repetition frequency), což způsobuje nižší prostorové rozlišení. Nedávné pokusy se zabývají snahou vyvinout novou generaci lidarů schopných mapovat mělké vody ve velmi přesném měřítku až do hloubky 12 m (u velmi čirých vod), které by využívaly pouze jednu vlnovou délku v zeleném spektru (532 nm). Schéma principu laserového skeneru založeného na jedné vlnové délce 532 nm zobrazuje obr. 9.



Obrázek 9. Princip fungování lidarů o jedné vlnové délce 532 nm (Riegl, 2015).

Oproti “tradičním” lidarům mají vysokou PRF a krátké, úzké pulzy. Krátké pulzy jsou nezbytné pro rozlišení odrazů ode dna a hladiny a zúžení signálu společně s vysokou PRF zajišťují vysoké prostorové rozlišení (Steinbacher a kol, 2012; Fernandez-Diaz a kol, 2014). Další rozdíl je ten, že při měření duálními lidary lze snadno odlišit, kdy paprsek pronikl do vody, protože k tomu napomáhá červená vlnová délka. V případě zeleného lidarů vodní hladina a povrch vody jsou zachyceny pomocí stejné vlnové délky, což může hlavně v mělkých a čistých vodách způsobit, že jsou odrazy od povrchu vody řídké (Steinbacher a kol, 2012) a je těžší odlišit, který odraz pochází od povrchu vody, ode dna či od nějaké mezivrstvy (Fernandez-Diaz a kol, 2014). Graf na obr. 10 zobrazuje odrazy od vodní hladiny, částic ve vodě a ode dna. Někdy může dojít k záměně odrazu od splavenin v toku a ode dna (Steinbacher a kol, 2010).



Obrázek 10. Schéma jednotlivých odrazů laserového paprsku při průniku do vody (Steinbacher a kol, 2010).

Nicméně zelené světlo neproniká pouze do vodního sloupce, ale je také odráženo od povrchu země a vegetace. Lidary o jedné vlnové délce mají tak velký potenciál pro bezešvé mapování ve vysokém rozlišení. To je jeden z dalších důvodů, proč jsou tyto lidary vyvíjeny (Fernandez-Diaz a kol, 2014; Mandlbürger a kol, 2015). O bezešvé mapování se snaží např. Fernandez-Diaz a kol (2014) s využitím lidarového senzoru Aquarius o jedné vlnové délce 532 nm. Cílem práce bylo dokázat, že lze dosáhnout uceleného mapování suchozemského i podvodního terénu v jednom mapování s přesností do jednoho metru v hloubkách 20 cm až 12 m v čiré vodě. Provedli testy na několika lokalitách v Kanadě a USA a soustředili se též na rozmanitost prostředí a hloubek – slané, sladké vody, různě čisté a hluboké, a v různých morfologických podmínkách. Dosáhli hustoty 8 bodů na m². Také popisují postup lidarů Aquarius při zpracování odrazů a jejich rozlišování. Postup vyžaduje několik kroků a tato fáze se zatím vyvíjí (Fernandez-Diaz a kol, 2014).

Další autoři Richardson a Moskal (2014) vidí problém zejména při mapování úzkých koryt, která jsou umístěna v husté vegetaci. Data získali pomocí lidarů Riegl VQ-820-G (532 nm) a Leica ALS60 (1064 nm). Dosažená hustota dat při sběru zeleným lidarem byla 3 – 4 body na m², červeným 8 bodů na m². Výsledky poukazují na to, že technologie je omezena obtížným proniknutím zeleného záření vegetací a avizují další výzkum.

Problematikou přesnosti lidarů v mělkých vodách se zabývají také vědci z University v Innsbrucku ve spolupráci s rakouskou společností Riegl Laser Measurement Systems, kteří se snaží dosáhnout toho, aby bylo zmapováno co největší území, ve vysokém rozlišení a v krátkém čase. Impulzem pro tyto snahy je

Vodní rámcová směrnice 2000/60/ES, jejíž dodržování vyžaduje neustálé sledování a kontrolu vodních ekosystémů, což je časově i finančně náročné (Steinbacher a kol, 2012). Tato směrnice představuje nejucelenější právní úpravu pro oblast vody pro státy Evropské unie. Zajišťuje ochranu vodních ekosystémů a celkovou péči o životní prostředí (MZ, 2016). Presentují laserový skener Riegl VQ-820-G o jedné vlnové délce 532 nm (viz obr. 9) Krátké a úzké pulsy jsou vysílány ve vysokých frekvencích, přičemž právě krátké pulzy umožňují oddělit odrazy od hladiny vody a dna v mělkých vodách. Úzké pulzy zajišťují vysoké rozlišení v rozmezí 20 – 50 bodů na m² (Steinbacher a kol, 2012). Vlastnosti laserového skeneru a výsledky zkušebního měření na modelovém korytě v prostorách univerzity uvádí (Pfennigbauer a kol, 2010) a (Steinbacher a kol, 2010). První opravdový test proběhl v únoru 2011, kdy byl zaměřen rybník v nivě Dunaje. Dosažená hustota bodů činí přibližně 50 bodů na m², takto vysoká hustota byla dána nízkou výškou letu (125 m) při nízké rychlosti. Byla úspěšně zaměřena maximální hloubka rybníka, která činí 4 m. Výsledky výzkumu uvádí (Mandlbürger a kol, 2011). Další výzkum proběhl v červenci 2011, kdy bylo zaměřeno část řeky Loisach a jezera Ammersee v Německu. Dosažená hustota bodů činila 10 – 25 bodů na m², po filtraci dat 10 – 15 na m². Řeka Loisach byla vybrána pro její rozmanitost, zahrnuje jak rychle proudící vody v horském prostředí tak pomalu tekoucí vody v prostředí zástavby. Výsledky uvádí (Steinbacher a kol, 2012). Autoři Steinbacher a kol (2012) uvádí maximální měřitelnou hloubku systému v rozsahu 1 Secchiho hloubky, což je hloubka, ve které lze ještě rozeznat barvy – černou a bílou na ponořeném kotouči o průměru 30 cm, který je rozdělen na 4 kvadranty které jsou střídavě zbarveny černě a bíle (Guenther a kol, 2000). Nicméně kvůli zákalu vody se přístroj nehodí pro širší, kalné vodní toky, zatížené splaveninami (Mandlbürger a kol, 2011).

Autoři se dále zaměřili na vývoj speciálních filtrovacích algoritmů, které budou schopny lépe rozeznat mezi odrazem od vodního povrchu, plovoucích rostlin či objektů, znečištění a dna koryta (Steinbacher a kol, 2012). Nový přístup modelování vodní hladiny v případě nedostatku odrazů a strategii pro zlepšení filtrovacích algoritmů pro modelování DMT uvádí (Mandlbürger a kol, 2015) na příkladu alpské řeky Pielach v Rakousku. Měření proběhlo v období dubna 2013, října 2013, února 2014 a října 2014, přičemž při posledním měření byl použit nový laserový skener VQ-880-G, primárně z důvodu kalibrace sensoru. I přesto, že v období října byla ještě vzrostlá vegetace, podařilo se řeku zaměřit s vysokou přesností. Ovšem řeka Pielach patří k typicky čistým alpským řekám a její průzračnost je vysoká (Mandlbürger a kol, 2015). Laserový skener VQ-880-G byl testován v červnu 2015 v USA. Bylo snímáno

několik lokalit se známou hloubkou, které představovaly různorodé podmínky, co se týče hloubky a kvality vody. Laserový skener prokázal komplexní zlepšení oproti předchozí verzi, co se týče průniku vodním sloupcem a hustoty bodů. Na Floridě byl sensor dokonce schopen zaměřit hloubku až 30 m, zatímco v Oregonu proběhlo měření na vnitrozemských vodních tocích s horší průzračností vody a přístroj prokázal, že je schopen měřit v podmínkách, kde ostatní laserové sensory již nestačí. Nicméně autoři v tomto případě neuvádí konkrétní hodnoty hloubek. Snadná integrace společně s možností online zpracování dat v reálném čase uvnitř zařízení činí systém dostatečně flexibilním a odolným pro širokou škálu aplikací (Pfennigbauer, 2015a; Pfennigbauer, 2015b).

Je nutné zmínit, že všechny typy "zelených" lidarů využívají pro zajištění vyššího rozlišení pouze střední pulsní energii, vysokou PRF a úzké paprsky, což má za následek menší stopu (tzv. footprint). Aby bylo možné operovat s laserovým skenerem, je nutné dodržovat minimální výšku letu (Pfennigbauer a kol, 2010). Bezpečná vzdálenost činí 100 m (pro lidské oko) a 500 m (zohlednění potenciálních osob využívajících dalekohled) (Mandlbürger a kol, 2011, Steinbacher a kol, 2012).

Současné laserové skenery zajišťují kvalitní a přesná batymetrická data, která tvoří základnu pro další výzkumy v různých oblastech, zejména při pobřežním mapování a mapování mělkých vod, získání základních dat pro prevenci povodní, mapování biotopů, archeologické průzkum pod vodou, hydraulický a vodohospodářský průzkum a mají velký potenciál zajistit mapování velkých území ve velmi krátkém čase a s minimálními náklady (Riegl, 2015).

3.4 Zpracování dat z lidarového měření

Data získaná pomocí leteckého laserového skenování mají podobu tzv. mračna bodů. Nejběžnější formát mračna bodů je binární formát LAS (*.las). Formát LAS obsahuje dvě hlavní složky datového souboru, hlavičku a vlastní data. Data jsou představována třemi sloupci prostorových souřadnic X, Y, Z (Carter a kol, 2012). Hlavička obsahuje obecné informace, jako např. počet bodů (Dolanský, 2004). Výhoda je jeho datová úspornost. Nevýhodou je omezený počet programů, které s ním dokáží pracovat. Naproti tomu formát ASCII (*.txt, *.xyz, *.asc) přečte většina běžných programů, je však náročný na objem dat, což způsobuje zpomalení jeho zpracování. Nevýhodou je ale velký objem dat, způsobující pomalé zpracování (Gojda a John, 2013).

Primární data jsou netříděná, nerovnoměrně rozmístěná a je nutno je zpracovat. Podle stupně komplexnosti se metody zpracování dělí na filtraci a klasifikaci. Při

filtraci jsou vyhledávány pouze body ležící na jednom určitém druhu povrchu (terénu). Je nutno odstranit nežádoucí body. Ruční zpracování mračka bodů je velmi časově náročné, je tedy nutné spoléhat se na automatizované postupy. Softwarové programy by měly být přesné a efektivní, je nutné neustále je zdokonalovat. Při klasifikaci se postupně všechny body rozdělují do předdefinovaných tříd, nejčastěji do tří základních tříd, tzn. terén, budova, vegetace (Dolanský, 2004), v případě batymetrie např. terén, hladina a dno. Následně je potřeba klasifikovaná mračka bodů vhodně interpolovat a vizualizovat, což umožňují GIS systémy. Nejběžněji využívaným GIS systémem je program ArcGIS od firmy Esri. ArcGIS je výkonný a flexibilní software, který umožňuje editaci, analýzu a modelování dat. Navíc extenze Spatial Analyst a 3D Analyst poskytují nástroje pro většinu datových operací. Lidarová data jsou reprezentována několika možnými datovými strukturami (body, linie, povrchy) a mohou být v různých formátech. Ne všechny formáty jsou podporovány programem ArcGIS a ne všechny jeho verze podporují stejné formáty. Např. formáty ASCII a LAS umí číst a efektivně zpracovat ArcGIS 10.1 a novější (Carter a kol, 2012).

Na základě zpracování dat v ArcGIS vzniká digitální model terénu nebo, v případě batymetrie, batymetrická mapa. Získají se interpolací z naměřených bodových hodnot. Každá z interpolačních metod má jiný potenciál pro modelování povrchu (Ismail a kol, 2016).

3.4.1 Digitální model terénu

Digitální model terénu (DMT), nebo též digitální model reliéfu (DMR) je zobrazení přirozeného, nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu, bez budov a vegetace. Zobrazuje tedy výškový průběh terénu. Naproti tomu digitální model povrchu (DMP) zobrazuje území včetně staveb a rostlinného pokryvu. DMT může být vytvořen pomocí pravidelné sítě bodů (regular grid), která je charakterizována diskrétními body pravidelně rozmístěnými do mřížky. Tento DMR reprezentuje např. Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G), kdy je pravidelná síť představována 5x5 m s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Nebo může být vytvořen pomocí trojúhelníkové nepravidelné sítě (TIN), což představuje Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G), kdy úplná střední chyba výšky je 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu nebo Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G), kdy úplná střední chyba výšky pro přesně vymezené objekty (budovy) je 0,4 m a pro objekty přesně neohrazené (lesy a vegetace) je 0,7 m (ČÚZK, 2010). Tyto digitální modely jsou výsledky nedávného mapování výškopisu ČR realizovaného leteckým laserovým skenováním v letech 2010 – 2014, jehož cílem bylo zpřesnění výškopisu

ČR. Výsledkem byly již jmenované DMR 4G, DMR 5G a dále vytvoření nového vrstevnicového modelu celého území ČR z dat DMR 5G do konce roku 2017 (Brázdil, 2009; Šíma, 2016). Podrobnější popis DMT a jejich modelování uvádí např. (Li a kol, 2005).

3.4.2 Batymetrická mapa

Je to v podstatě model terénu pod vodou. V počátcích byly batymetrické mapy v papírové formě, dnes jsou též v podobě digitální. Popis tvorby batymetrické mapy v ArcGIS uvádí např. americký vědec Brian Huggett. On a jeho tým v roce 2008 odebírali vzorky sedimentů pro analýzu pesticidů na jezeře Fletcher v Yosemiteském národním parku v pohoří Sierra Nevada. Pomocí jednotky GPS a hloubkoměru zaznamenávali polohu a hloubku odebraných vzorků. Poté, co vzorky shromáždili, si uvědomili, že kombinací dvou technik, kterých využili, je možné vytvořit též batymetrickou mapu jezera, která by byla první mapou svého druhu pro jezera v této oblasti. Toto bylo možné díky tomu, že obě informace, hloubková i polohová, byly získány ve stejném čase. Pomocí sonaru shromáždili hustou síť X, Y a Z bodů, ze kterých mohl být následně interpolován průběh terénu (Steinberg, 2009).

Batymetrická mapa, ať v analogové či digitální formě, musí mít všechny náležitosti typické pro mapový výstup. Musí obsahovat měřítko, směrovou růžici a legendu, která vysvětluje hloubkové poměry. Hloubkové poměry se znázorňují pomocí izolinií, jež jsou v případě batymetrické mapy nazývají izobáty (hloubnice). Jsou to spojnice míst o stejné hloubce. Je to obdoba vrstevnic, avšak pod vodní hladinou. Izobaty mohou být doplněny barevnou škálou odlišující jednotlivé hloubkové stupně. Jedná se o barevnou hypsometrii, v našem případě barevnou batymetrii. Barva se používá zpravidla modrá a platí zásada, že čím hlouběji, tím tmnější barva. Dále se můžou objevit kóty, zobrazující konkrétní hloubku dna, což je vhodné např. u nejhlubšího bodu. Kótu představuje značka a k ní připsaná číselná hodnota hloubky. Hodnoty hloubky na batymetrické mapě mají relativní hodnotu, tedy nezobrazují nadmořskou výšku, ale vzdálenost od vodní hladiny. Hodnoty nadmořské výšky také mohou být vyjádřeny klasickými vrstevnicemi. Nejdůležitější je výsledná přehlednost mapy jako celku (Česák a Šobr, 2005; Krtička, 2007; Plánka, 2014).

3.4.3 Interpolační metody

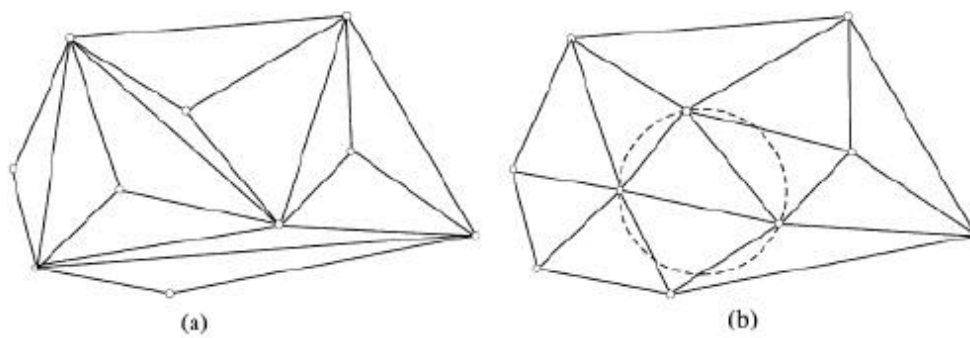
Interpolace je proces, při kterém jsou pomocí matematických funkcí předpovídány neznámé hodnoty na základě hodnot známých (Burrough a McDonnell, 1998). Namísto pracného a nákladného měření všech hodnot, lze zaměřit pouze hodnoty na strategicky rozmístěných místech a ostatní hodnoty budou přiřazeny na základě

interpolace (ESRI, 2012a). Každá z interpolačních metod má jiný potenciál pro modelování povrchu a je vhodná pro jiný typ dat (Ismail a kol, 2016).

Obecně se interpolační metody dělí na deterministické a geostatické. Deterministické metody přiřazují hodnoty na základě okolních naměřených hodnot a matematických výpočtů. Mezi ně se řadí např. IDW, Natural Neighbor, Spline. Geostatické metody používají matematické a statistické funkce, které zahrnují autokorelaci (prostorový vztah mezi měřenými body). Následně tyto metody poskytují také určitou míru jistoty nebo přesnosti předpovědi. Mezi geostatické metody se řadí např. Kriging (ESRI, 2012a). Dále lze interpolační metody rozdělit na lokální a globální. Lokální interpolace pracuje pouze uvnitř menšího území, tzn. v sousedství daného bodu. Naproti tomu globální interpolace využívá pro vytvoření daného odhadu všech dostupných dat. Interpolační metody také mohou být exaktní, kdy je hodnota daného bodu po interpolaci stejná jako hodnota zaměřená (před interpolací) a aproximační, kdy je hodnota v rámci interpolace změněna (Burrough a McDonnell, 1998).

Interpolací vzniká spojitý model terénu v rastrové podobě. Model terénu lze vytvořit také jako TIN (Triangulated irregular network). Model terénu je pak představován trojúhelníkovou nepravidelnou sítí, kdy dané body reprezentují vrcholy, které jsou pomyslně spojeny a tvoří síť trojúhelníků. Existují různé interpolace při tvorbě TIN, ArcGIS využívá metodu Delaunay triangulace. Ta spočívá v předpokladu, že tři vstupní body tvoří vrcholy Delaunay trojúhelníku pouze tehdy, když žádný jiný vstupní bod neleží uvnitř kružnice opsané kolem tohoto trojúhelníku (obr. 8b). Tato metoda je vhodná při nepravidelném rozložení zaměřených bodů (ESRI, 2012b). Digitální model terénu v podobě TIN je přesnější než ostatní metody reprezentace (Bhargava a kol, 2013). To je výhodou i nevýhodou (např. pro velká zájmová území s vysokým počtem bodů by tvorba TIN trvala dlouho a výsledný model terénu by byl příliš objemný).

Výběr správné interpolační metody je v dnešní době hojně řešená problematika. Výsledný odhad veličiny je interpolován v závislosti na typu, množství a rozmístění dat, což naznačuje, že neexistuje žádný obecně vhodný interpolační postup ani univerzální interpolační metoda. Pro správný odhad batymetrie je tedy nutné vzájemně porovnat celou řadu interpolačních postupů (Caruso a Quarta 1998; Panhalkar a Jarag, 2016). Pro potřeby diplomové práce byla využita interpolace pomocí TIN, právě kvůli nepravidelnosti rozložení vstupních dat. Cílem práce nebylo najít nejvhodnější interpolační metodu pro tvorbu batymetrické mapy, ale porovnat dvě sady dat.



Obrázek 11. Trojúhelníková nepravidelná síť, jež není představována Delaunay trojúhelníky (vlevo) a Delaunay trojúhelníková síť (vpravo)(Hanjiang a kol, 2008).

4. Charakteristika vybraných lokalit

Leteckým laserovým skenováním bylo zaměřeno několik vodních nádrží a zhruba 6 km dlouhý úsek Vltavy. Výběr zájmového území pro potřeby této práce byl proveden na základě dostupnosti dat pro srovnávací měření. Vybranými lokalitami jsou VD Hracholusky a úsek řeky Vltavy v Hluboké nad Vltavou.

4.1 Vodní dílo Hracholusky

VD Hracholusky se nachází na řece Mži přibližně 20 km západně od Plzně. Leží na hranici okresů Tachov a Plzeň sever v Plzeňském kraji. Původně se na řece Mži, zhruba 10 km nad stávajícím profilem, nacházel vysoký jez. Ten však koncem 50. let 20. století nebyl již schopen zajistit odběry na dolním toku Mže, a tak v roce 1959 vydal Krajský národní výbor rozhodnutí o stavbě hráze. Do trvalého provozu byla stavba uvedena roku 1964. Hlavním účelem přehradní nádrže byla akumulace vody pro průmyslové a zemědělské využití na západě Čech. Mezi další účely patří zejména zachycení povodní, zajištění minimálního zůstatkového odtoku, energetické využití, rekreace a rybolov. Hráz je sypaná, zemní se středním jílovým těsněním v návodní části hráze a nachází se v říčním kilometru 22,673. Délka hráze v koruně je 270 m, výška nade dnem je 26,5 m. Přehrada má dva přelivy – korunový a šachtový. Korunový boční přeliv s dlouhým železobetonovým skluzem je situován v pravé části hráze. Šachtový přeliv je součástí sdruženého objektu, jeho koruna se nachází o 50 cm výše než koruna bočního přelivu. Součástí jsou také dvě spodní výpusti a malá vodní elektrárna (PV, 2013b).

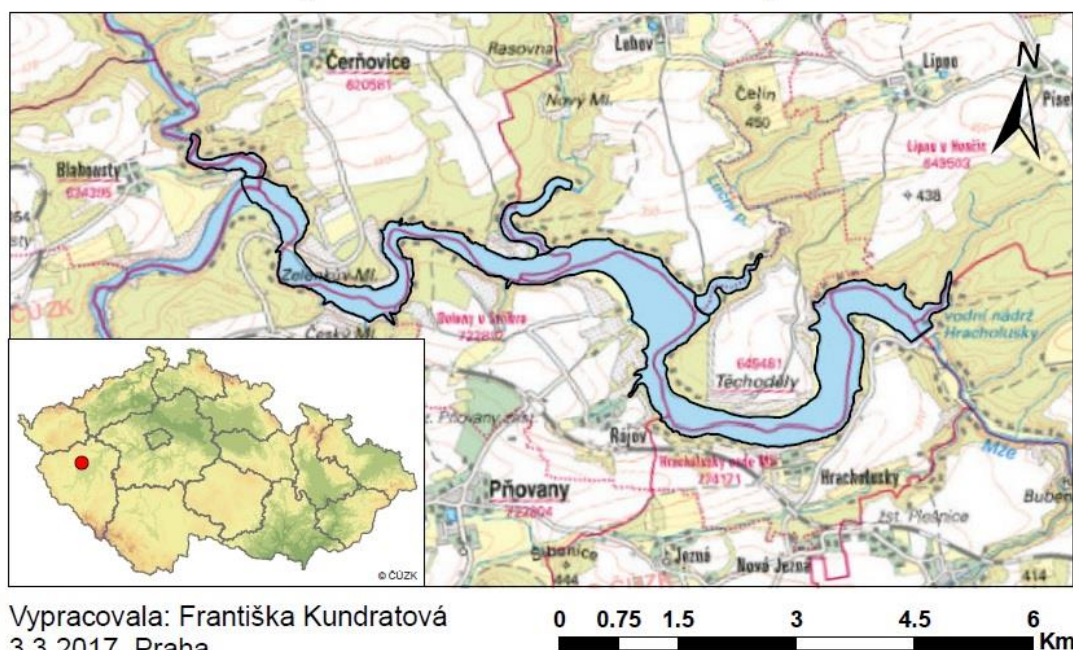
Zatopená plocha činí 489,62 ha a celkový objem nádrže je 56,65 mil. m³. Průměrný dlouhodobý roční průtok řeky Mže je 8,28 m³/s a stoletý průtok Q₁₀₀ je 326 m³/s. Průměrný roční stav je 74 cm a nejvyšší stav vody byl zaznamenán v květnu 2006 (372 cm) a v srpnu 2002 (370 cm) druhý nejvyšší (ČHMÚ, 2017). Průměrná roční teplota vzduchu se v oblasti dlouhodobě pohybuje mezi 7 – 8 stupni a průměrný roční úhrn srážek se pohybuje v rozmezí 500 – 600 mm (ČHMÚ, 2008). Součástí VD Hracholusky jsou přítoky, které vytváří samostatné zátoky. Nachází se na levém břehu a jedná se o Úterský a Žebrácký potok. Dále také Luční potok, který vytváří menší zátočinu. Plocha povodí je 1608,96 km² (ČHMÚ, 2017).

Přehrada vyplňuje poměrně úzké a skalnaté údolí se strmými břehy. V oblasti se nachází zhruba 2500 chat, rekreačních objektů a autokempů. Okolí nádrže je hojně využíváno k rekreaci a turistice (Stránský, 2010). Přes nádrž vedou dva mosty,

silniční a železniční. Geologické podloží VD Hracholusky tvoří kvartérní nivní sedimenty (hlína, písek štěrk). V okolí nádrže jsou to pak hlavně štěrky, písčité štěrky, písky až jíly, břidlice a droby. Dále se zde vyskytují sprašové hlíny, spraše a kamenité až hlinito-kamenité sedimenty (Geology, 2017a).

Konkrétní vybraný úsek (viz obr. 12) začíná v místě, kde přítok Úterského potoka vytváří zátočinu a přechází v samotnou nádrž, zhruba v říčním kilometru 31,5 a končí hrází zhruba v říčním km 22,3. Přes zvolený úsek vede silniční most.

Vybraná část VD Hracholusky



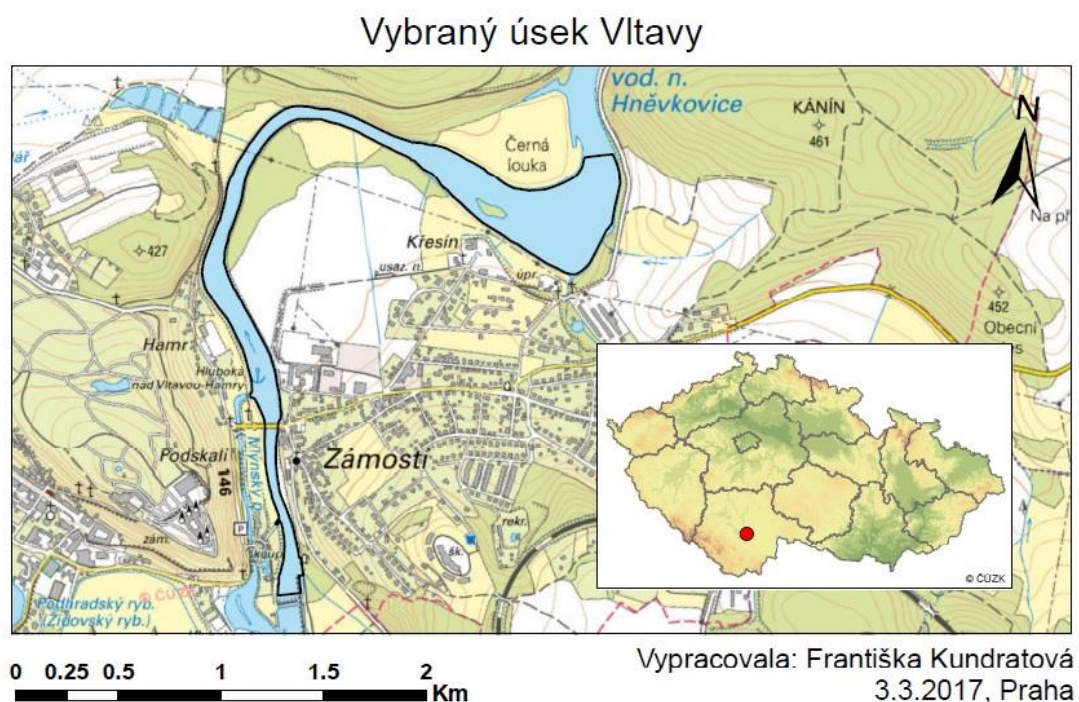
Obrázek 12. Poloha VD Hracholusky v rámci ČR a vyznačení zájmové oblasti (vlastní tvorba, 2017).

4.2 Vltava v úseku v Hluboké nad Vltavou

Řeka Vltava pramení na Šumavě a má dvě pramenné větve. Za hlavní z nich je považována Teplá Vltava, pramenící na východním úbočí Černé hory, v nadmořské výšce 1172 m n. m. Druhý pramen se nazývá Studená Vltava, pramení v Bavorsku. Obě větve se slévají poblíž obce Chlum v Mrtvém luhu a dále se nazývají Vltava. Vltava je dlouhá 430 km a je nejdelší řekou na území ČR. Plocha povodí řeky Vltavy činí 28090 km² a z toho 27006,7 km² na území ČR, zaujímá jižní část Čech. Vltava se vlévá do Labe u města Mělník (156 m n. m.). Vltava je v místě soutoku širší a mohutnější a má také delší tok než Labe, avšak po soutoku se jedná o Labe.

Průměrný roční průtok v Českých Budějovicích činí 27,6 m³/s a v Praze (hlásná stanice Chuchle) činí 143 m³/s (ČHMÚ, 2017b).

Vybraný úsek řeky Vltavy je zobrazen na obr. 13. Nachází se zhruba 9 km severně od Českých Budějovic v Jihočeském kraji (okres České Budějovice) a je přibližně 3 km dlouhý (jedná se o říční kilometry zhruba 229 km až 226 km). Prochází městem Hluboká nad Vltavou, které leží na obou březích. Do Vltavy se zde vlévají pravostranné přítoky Opatovický potok (na 228,9 ř. km) a Luční potok (na 226,4 ř. km). Úsek začíná v místě, kde se nachází jez Hluboká nad Vltavou (229 ř. km) a končí zhruba 400 m za čistírnou odpadních vod (226 ř. km). Přes Vltavu vede v obci silniční most (zhruba v ř. km 228,5). Úsek toku směřuje od jezu na sever a je rovný, zhruba po kilometru pokračuje širokým obloukem doprava a následně menším, ale prudším obloukem doleva a v jeho třech čtvrtinách končí. V tomto oblouku se řeka rozšiřuje a patrně zde dochází k usazování materiálu. V pravé části řeky se nachází malý ostrov z naplavenin.



Obrázek 13. Poloha zájmové lokality Vltava a vyznačení konkrétního úseku v Hluboké nad Vltavou (vlastní tvorba, 2017).

Oblast se řadí do povodí horní Vltavy. Nachází se v místech, kde Českobudějovická pánev přechází do Táborské pahorkatiny. V blízkosti se nachází

VD Hněvkovice, vzdutí nádrže začíná v ř. km 225,3. Co se týče geologického podloží, celý úsek řeky tvoří podloží kvartérních nivních sedimentů. Okolí je velmi pestré, nachází se tu převážně písky, štěrkopísky, písčitohlinité a hlinitopísčité sedimenty, dále pararuly a migmatit (Geology, 2017b). Říční břehy v oblasti jsou většinou strmé s občasnými mělkými úseky rozšiřujícími se do řeky. Říční dno má tmavou barvu a ve vodě je vysoký obsah organických látek.

5. Metodika

5.1 Kontrolní (sonarová) data

5.1.1 Metodika sběru kontrolních dat

Kontrolní data byla poskytnuta Katedrou vodního hospodářství a environmentálního modelování (KVHEM) České zemědělské univerzity (ČZU) v Praze. Jedná se o data zaměřená v rámci projektu Technologické agentury ČR (TAČR) v rámci programu Alfa, č. TA04020042 – Nové technologie batymetrie vodních toků a nádrží pro stanovení jejich zásobních kapacit a sledování množství a dynamiky sedimentů. Projekt TAČR je zaměřený na otázky týkající se vhodné technologie batymetrie nádrží, sledování dynamiky sedimentů, omezení vzniku samotného sedimentu, ověření vhodnosti současného softwarového vybavení a ověření získaných výsledků s výstupy daných modelů.

Data byla zaměřena echosounderem RiverSurveyor M9 firmy SonTek osazeném na kajaku v provedení RTK – GPS, což je nejnovější metoda měření využívající referenční stanici poskytující přesné údaje o poloze s přesností pozice do 3 cm. Jedná se o ADCP zařízení založené na Dopplerově jevu (viz kapitola 3.3.3.6), které je kromě měření hloubek schopno také měřit rychlost průtoků v daném profilu. Hlavní součástí zařízení je měřicí hlavice M9, která je vhodná pro malé i velké vodní toky. Disponuje devíti paprsky a zaznamenává hloubky dvěma způsoby zvanými Vertical beam a Bottom-track. Vertical beam zajišťuje měření jedním paprskem až do hloubek 80 m. Jeho nevýhoda spočívá v tom, že je pouze jeden. Narazí-li na nějakou překážku (např. rybu), odrazí se od ní a údaj o hloubce je nepřesný. Bottom-track využívá k určení hloubky dvě čtveřice rychlostních sensorů a dle hloubky vody přístroj přepíná frekvenci sensorů pro měření rychlosti. Výslednou hloubku určí jako průměrnou hloubku z jednotlivých paprsků. Čím větší je měřená hloubka, tím je větší i rozptyl paprsků a výsledná průměrná hloubka tak může být zkreslena. Bottom-track je vhodný pro měření hloubek v rozsahu 0,2 – 40 m (SonTek, 2010; ČHMÚ Brno, 2017).

Kontrolní data Hracholusk byla poskytnuta ve formátu (*.riv) a bylo nutno je nejprve exportovat ze softwaru RiverSurveyor Live. Postup zpracování dat je uveden v kapitole 5.1.2. Byla využita data zaměřená v letech 2014 – 2015. Při měření na Vltavě byla použita sestava s dálkově ovládanou lodkou. Data Vltavy byla poskytnuta již jako bodová vrstva pro ArcGIS.

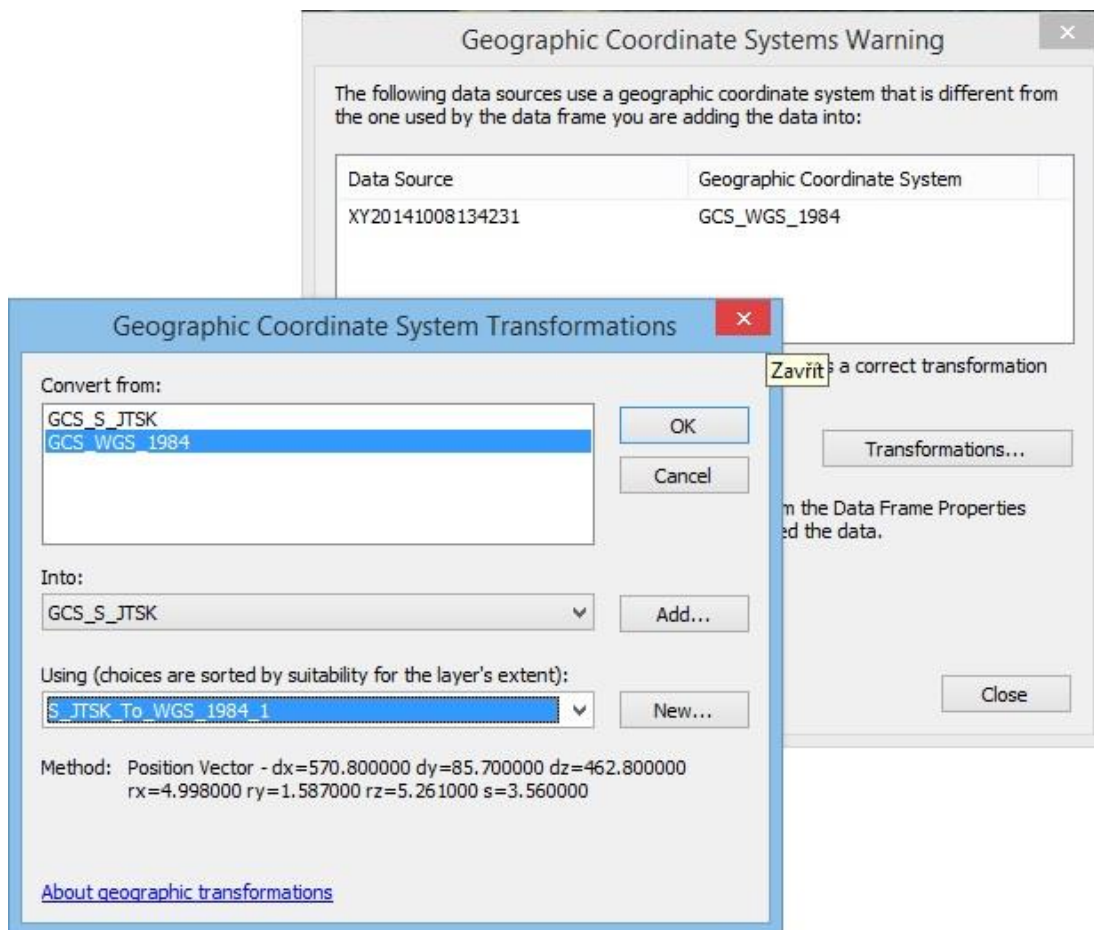
Pro VD Hracholusky byla pro potřeby DP též k dispozici sonarová data zaměřená Povodím Vltavy měřícím člunem Joska. Jedná se o laminátový kajutový člun

Quicksilver typ 650 vybavený ultrazvukovou měřicí aparaturou MD500 od firmy Meridata. Pořizuje data v souřadnicích X, Y, Z, která jsou transformována do systému S-JTSK. Technologie umožňuje měření hloubky sedimentů, klasické měření hloubek i vyhledávání případných překážek. Rozsah hloubek pro měření je 1 – 200 m. Lze ho uplatnit pro měření na přehradních nádržích, rybnících i vodních tocích (PV, 2013c). Společně s lodí Valentýna II se uplatňují pro účely kontroly vodních cest, jakosti vod či k tvorbě podkladů pro projekční práce a matematické modelování (PV, 2013). Data byla poskytnuta ve formátu (*.txt).

5.1.2 Zpracování kontrolních dat

5.1.2.1 Hracholusky

Data získaná pomocí echosounderu byla ve formátu (*.riv) a pro jejich následnou editaci byl potřeba softwarový program RiverSurveyor Live for PC. Z RiverSurveyor Live je možné exportovat data do MS Excel. V Excelu bylo nutno provést několik úprav. Od výšky hladiny, která byla aktuální v daný den měření, byly odečteny naměřené hloubky, tím byla získána nadmořská výška dna nádrže. V tabulce byly ponechány pouze X, Y souřadnice a nově vypočítaná nadmořská výška Z. Hlavičky sloupců byly upraveny tak, aby odpovídaly formátu vhodnému pro ArcGIS, tedy bez mezer a diakritiky, zkopírovány do textového editoru a uloženy do formátu (*.txt). Samotný import do ArcGIS byl proveden v prostředí ArcCatalogu pomocí nástroje Create Feature Class from XY Table. Zde byly přiřazeny názvy sloupců k odpovídajícím souřadnicím X, Y, Z a zvolen souřadnicový systém WGS 84/UTM 33N, ve kterém jsou souřadnice zaznamenány. Transformace na S-JTSK Křovák East North se provádí automaticky v ArcGIS během přidání nově vzniklé vrstvy do ArcMAP (obr. 14).



Obrázek 14. Transformace bodové vrstvy ze souřadnicového systému WGS 1984 na souřadnicový systém S-JTSK Křovák East-North.

Následně byla bodová data spojena funkcí Merge tak, aby vznikla jedna bodová vrstva. Z této byl následně vytvořen digitální model terénu ve formátu TIN (pomocí funkce Create TIN v extenzi 3D Analyst). Vizuální kontrola povrchu odhalila chybové a extrémní hodnoty, které bylo nutno přesně určit a odstranit. Aby bylo možno vzniklý model terénu oříznout podle zájmového území, byl převeden na rastr (s velikost buňky 1x1m) pomocí funkcí TIN to raster, následně byla použita funkce Extract by mask. Výsledný rastr byl vhodně vizualizován a připraven pro porovnání s lidarovými daty, které zobrazuje mapový výstup na obr. 34 v příloze. Data pro VD Hracholusky z měřicího člunu Joska byla ve formátu textového dokumentu. Pro vložení do ArcGIS byl použit stejný postup pomocí nástroje Create Feature Class from XY Table. Dále byl vytvořen DMT v podobě TIN, který byl vizuálně zkontrolován, následně převeden na rastr (1x1 m), oříznut podle zájmového území a vhodně vizualizován. Porovnání výsledného DMT s DMT z lidarových dat zobrazuje mapový výstup na obr. 33 v příloze.

V případě dat Vltavy, která byla ve formátu (*.shp), byla data vložena do ArcGIS, dále pomocí stejného postupu vytvořen DMT v podobě TIN, vizuálně zkontrolován, dále převeden na rastr, oříznut dle zájmového území Vltavy a vizualizován. Porovnání výsledného DMT s DMT z lidarových dat zobrazuje mapový výstup na obr. 40 v příloze.

5.2 Lidarová data

5.2.1 Metodika sběru lidarových dat

Letecké laserové skenování zajistila společnost Georeal s r. o. laserovým skenerem Riegl VQ-880-G od rakouské firmy Riegl. Laserový skener byl umístěn na letadle Tecnam P2006T. Měření bylo uskutečněno 25.4.2016.



Obrázek 15. Hlavní funkční prvky skeneru Riegl VQ-880-G (Riegl, 2016).

Riegl VQ-880-G (obr. 15) je plně integrovaný letecký laserový systém pro kombinované topografické a batymetrické mapování. Jedná se o duální lidar, který využívá infračerveného i zeleného laserového paprsku. Dle kvality vody a znečištění je schopen měřit i pod vodní hladinou. Princip duálního lidaru je schematicky zobrazen na obr. 7 a jeho popis viz kapitola 3.3.4. Přístroj je vybaven integrovanou GNSS/IMU jednotkou (pro přesné určení umístění a orientaci přístroje) a digitální kamerou s vysokým rozlišením (pro vytvoření leteckých RGB snímků). Laserový skener vyšle paprsek a podle doby, za kterou se paprsek vrátí zpět a analýzy dopadového signálu, určí lokální souřadnice X, Y, Z zaměřovaného bodu. Naskenované body v lokálním systému jsou poté přepočítány pomocí IMU jednotky do GNSS souřadnic a spojovány do zaměřeného mračna bodů.

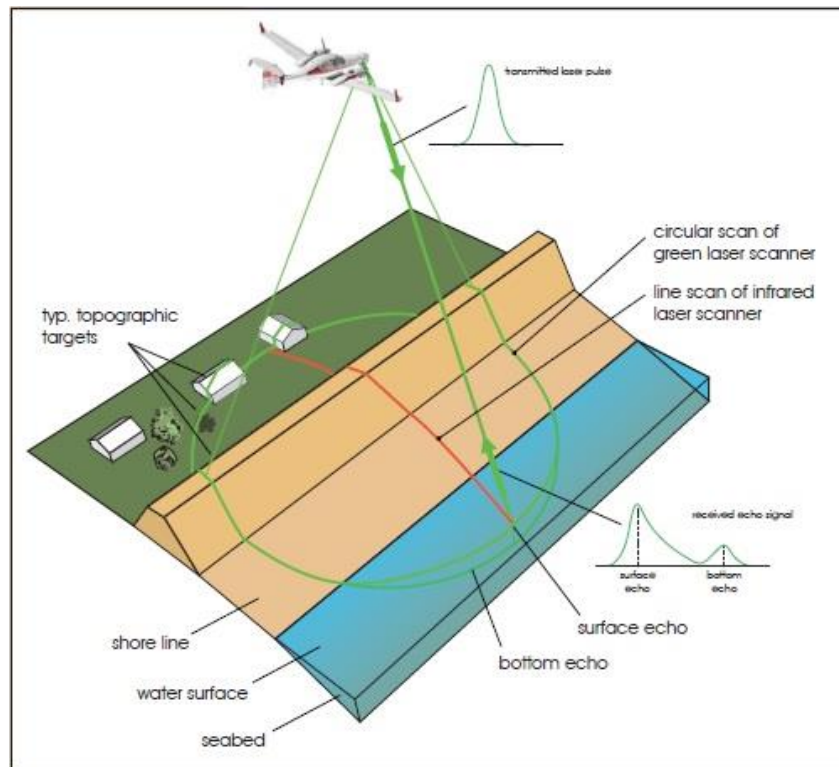
Přístroj dokáže skenovat rychlostí až 550 000 bodů za vteřinu. Měřitelná hloubka zeleného paprsku je uváděna v rozsahu 1,5 Secchiho hloubky při doporučené letové výšce 600 m s přesností 25 mm. Tato výška zajišťuje také bezpečnou vzdálenost pro oko. Výrobce udává bezpečnostní vzdálenost od zeleného laserového skeneru 100 m (pro lidské oko) a 500 m (zohlednění potenciálních osob využívajících

dalekohled). Pro dosažení maximální možné hloubky musí při měření být optimální podmínky – čistá a průhledná voda (Riegl, 2015).

Technické parametry skeneru:

- Wavelength (vlnová délka)	532 nm (viditelné zelené záření)
- Measurement range (rozsah měření)	1,5 Secchi depth with bright ground
- Accuracy (přesnost)	25 mm
- Scanner field of view (zorné pole)	40°
- Laser beam divergence (divergence paprsku)	0,7 – 1,7 mrad
- Laser pulse repetition rate (rychlost opakování)	550 kHz
- Max. effective measurement rate (max. efektivní rychlost měření)	up to 550 000 measurements/sec
- Flying altitude (optimální výška letu)	600 m
- Point density (hustota bodů na m ²)	10 - 50 points/m ²
- Footprint (velikost stopy laserového paprsku)	10 – 100 cm
- Scan pattern (skenovací vzor – viz obr. 16)	Circle
- Weight (váha)	60 kg

(Doneus a kol, 2015; Pfennigbauer, 2015a; Pfennigbauer, 2015b; Riegl, 2016).



Obrázek 16. Schéma zaznamenávání povrchu – zelený paprsek snímá povrch v kruhovém vzoru, infračervený liniově (Riegl,2016).

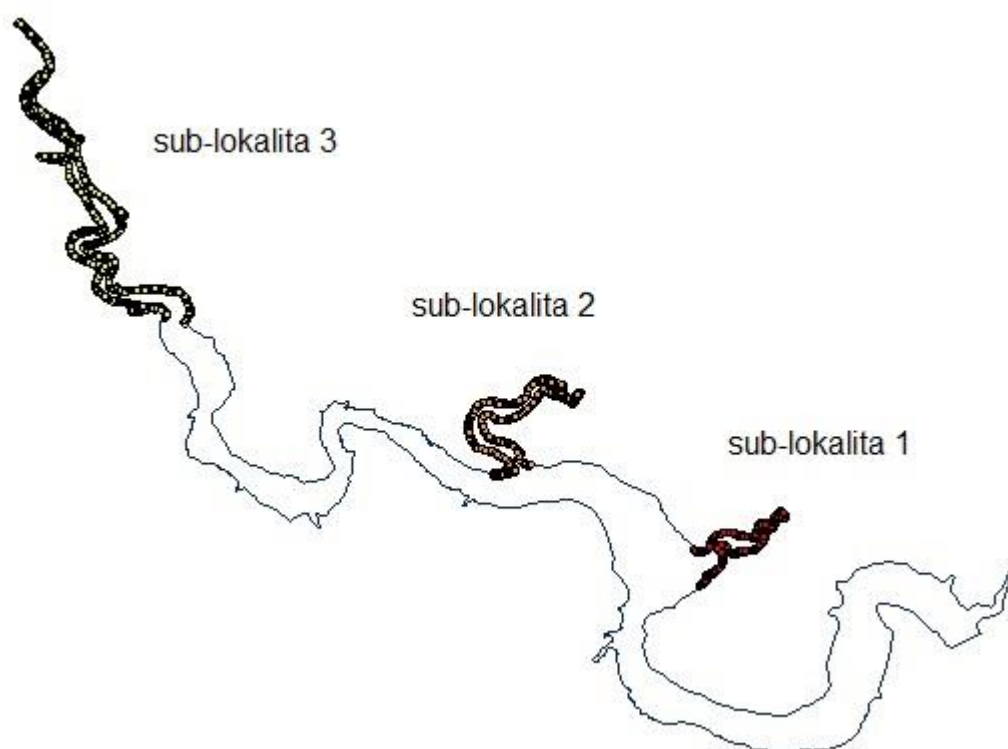
Naměřené mračno je nutno dále upravit. Prvním krokem úpravy je filtrace bodů pomocí proužkové analýzy, kde se přepočítají rozptýlené body od správné pozice paprsku tak, aby vzniklo konsistentní mračno bodů. Do jednoho proužku jsou vzaty body s rozptylem +/- 7 – 10 cm. Tím je určena i standardní odchylka bodu v mračnu. Dále je konsistentní mračno transformováno na základě vlíčovacích bodů do systému UTM 33N, standardní odchylka transformace byla +/- 6 cm. Vlícovací body byly zaměřeny metodou GNSS – RTK. Ze systému UTM 33N byly poté souřadnice bodu transformovány do S-JTSK pomocí schváleného transformačního programu ETJTZU 2013 schváleného ČÚZK pro transformaci z ETRS89 do S-JTSK. Výstupem je mračno bodů (soubor souřadnic X, Y, Z) v systému S-JTSK tvořící digitální model nasnímaného terénu.

Naskenované mračno bodů bylo rozděleno do 3 kategorií: terén, vodní hladina, dno pod vodou. Pro potřeby DP byla využita pouze poslední kategorie a to body označující dno pro dvě lokality – Vltava a VD Hracholusky.

5.2.2 Zpracování lidarových dat

5.2.2.1 Hracholusky

Výsledná mračna bodů byla v souřadnicovém systému S-JTSK ve formátu textového dokumentu (*.txt). Pro vložení do ArcGIS bylo nejprve nutné data rozdělit do 7 jednotlivých textových dokumentů. Následně byl každý z nich vložen do ArcGIS pomocí nástroje Create Feature Class from XY Table. Bylo nutno nastavit souřadnicový systém S-JTSK a přiřadit odpovídající názvy sloupců. Potom bylo možno vložit výsledné bodové vrstvy do ArcGIS. Po zobrazení bodů bylo zřejmé, že lidarem byla zaměřena pouze mělká místa podél břehů. Proto pro podrobnější zpracování byly vybrány tři sub-lokality, které tvoří zátočiny Úterského, Žebráckého a Lučního potoka při soutoku s nádrží, nikoli samotná nádrž. Tím bylo jasné, že nebude možné vytvořit uspokojivý digitální model terénu vybraného úseku VD Hracholusky v odpovídající kvalitě sonarového měření. Pro další zpracování byly tedy vybrány tyto tři sub-lokality (obr. 17).



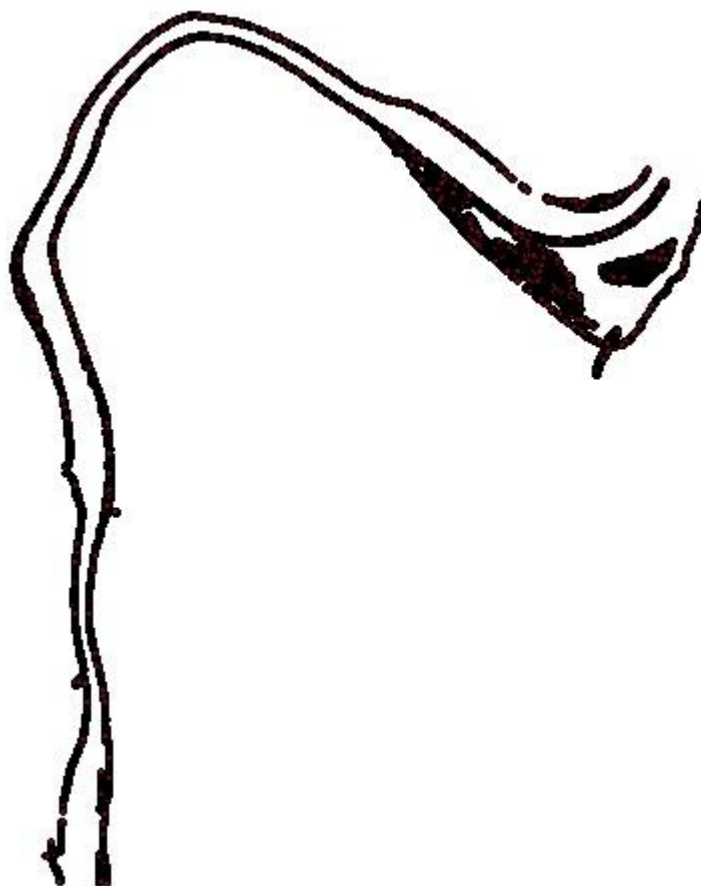
Obrázek 17. Bodové vrstvy zaměřené lidarem pro tři dílčí sub-lokality VD Hracholusky (vlastní tvorba, 2017).

Dílčí bodové vrstvy byly spojeny do tří vrstev dle rozmístění bodů tak, aby odpovídaly vybraným lokalitám. Následně z každé z nich byl vytvořen digitální model

terénu reprezentovaný nepravidelnou sítí TIN, nástrojem Create TIN. Použitím nástroje TIN to raster byl digitální model převeden na rastr (velikost buňky 1x1 m). Nakonec bylo nutné rastr oříznout a vytvořit tak tři DMT pro každou z těchto lokalit. Byla použita funkce Extract by mask a rastr byl oříznut podle jednotlivých polygonů reprezentujících danou lokalitu. Výsledné DMT všech tří sub-lokalit zobrazuje mapový výstup na obr. 35 v příloze.

5.2.2.2 Vltava:

Data Vltavy byla zpracována obdobně, s tím rozdílem, že je nebylo nutno dělit na několik textových dokumentů, byla vložena jako jedna bodová vrstva. Zaměřené body se vyskytovaly po celé délce vybraného úseku řeky Vltavy, pouze však po obvodu břehů a v místě mělčin (obr. 18). Jako v případě Hracholusk, byl vytvořen nejprve TIN model terénu, který byl následně převeden na rastr a oříznut podle zájmového území Vltavy. Výsledný DMT zobrazuje obr. 40 v příloze, společně s DMT z dat zaměřených echosounderem RiverSurveyor M9.



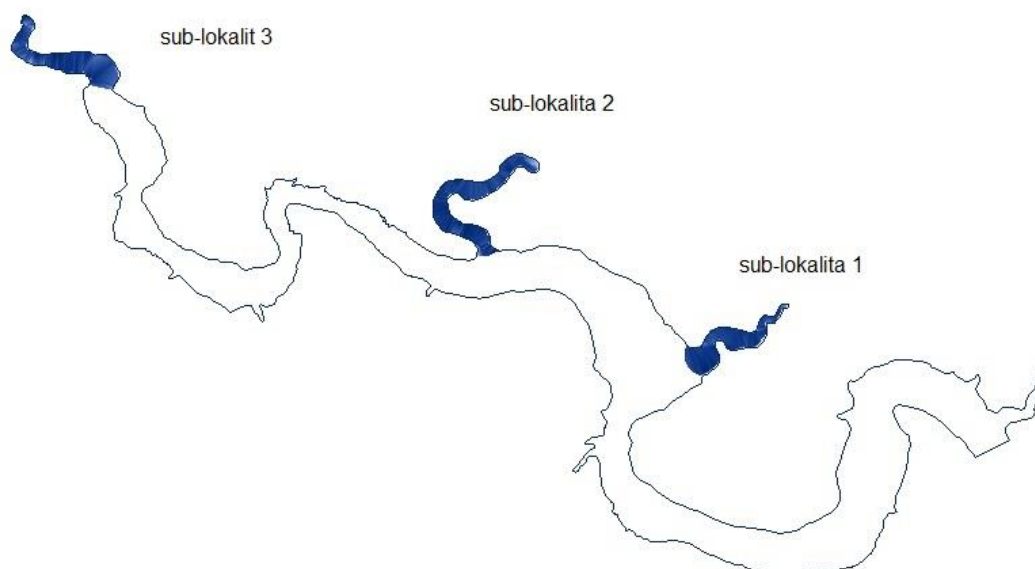
Obrázek 18. Bodové vrstvy zaměřené lidarem pro vybraný úsek řeky Vltavy (vlastní tvorba, 2017).

6. Výsledky

Při zpracování DMT jsem vycházela z naměřených lidarových a sonarových dat, která mi byla poskytnuta KVHEM ČZU. Data byla zpracována v softwaru ArcGIS v průběhu ledna – března 2017.

6.1 Hracholusky

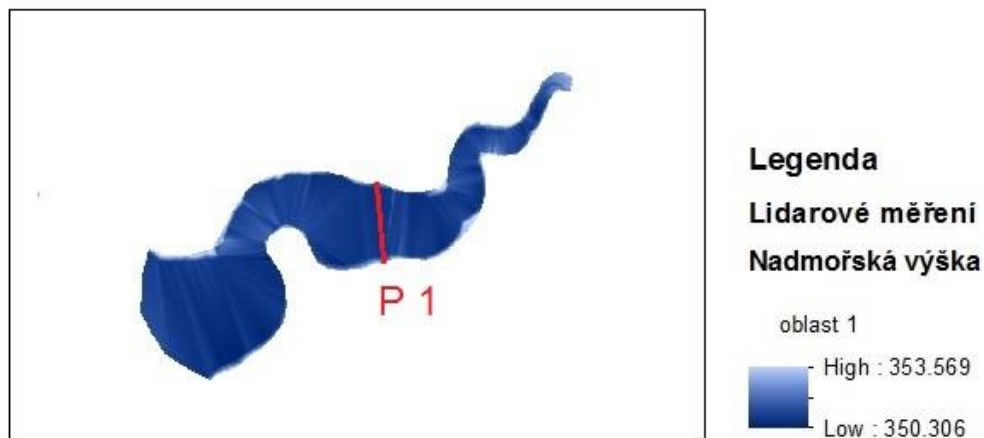
Již při vložení bodových lidarových dat do ArcGIS bylo zřejmé, že lidarová data nejsou uspokojivá a nelze z nich vytvořit odpovídající digitální model terénu jako celek. Byly tedy vybrány 3 dílčí sub-lokality, které obsahují souvislá bodová data umožňující vytvoření digitálního modelu terénu (obr. 19). Nadmořské výšky vzniklých DMT se pohybují v rozmezí od 350,3 do 353,5 metrů nad mořem a podrobněji je zobrazuje obr. 35 v příloze. Dále pak na obr. 33 a 34 v příloze je zobrazeno porovnání DMT sub-lokalit s DMT vytvořenými z měřicího člunu Joska a z echosounderu RiverSurveyor M9.



Obrázek 19. Schéma digitálních modelů terénu VD Hracholusky vytvořených na základě dat leteckého laserového skenování (vlastní tvorba, 2017).

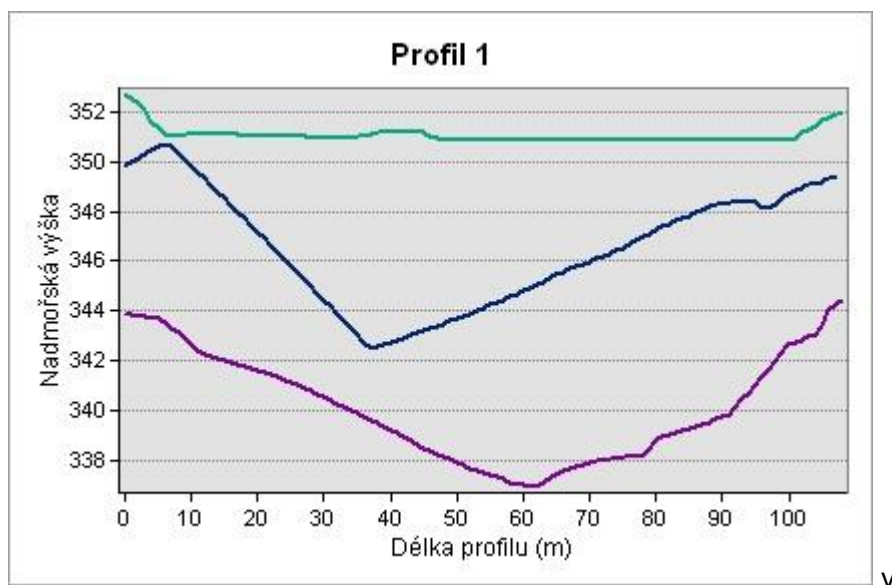
Interpolované nadmořské výšky stejné oblasti vytvořené ze sonarových a lidarových dat se liší. Sub-lokalitu 1 představuje zátočina tvořená přítokem Lučního potoka do VD Hracholusky. Nadmořské výšky interpolované z lidarových dat se pohybují v rozmezí od 353,57 do 350,30 metrů nad mořem (obr. 20). Nadmořské výšky interpolované z dat naměřených echosounderem RiverSurveyor M9 se pohybují ve stejné oblasti od 344,75 do 324,10 m n. m. a konečně nadmořské výšky interpolované z dat zaměřených měřicím člunem Joska v rozmezí od 352,68 do

331,77 m n. m. Pro podrobnější informace o rozmístění nadmořských výšek ze všech tří měření je k dispozici obr. 36 v příloze.



Obrázek 20. Digitální model terénu z lidarových dat sub-lokality 1 a vybraný příčný profil P1 (vlastní tvorba, 2017).

Z nadmořských výšek vyplývá, že také sonarová měření Joskou a echosounderem se od sebe liší. Pro lepší vizualizaci byl vybrán příčný profil P1 (obr. 20), pro který byl vytvořen průběh dna zaměřeného jak lidarem, tak oběma sonarovými metodami, což zobrazuje graf na obr. 21.

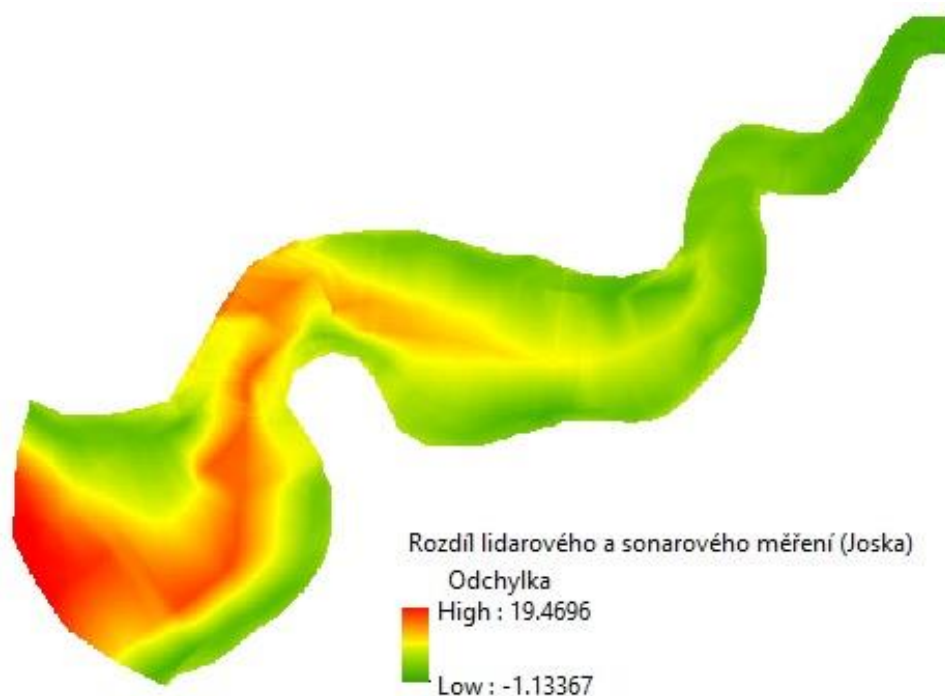


Obrázek 21. Příčný řez profilem P1 v sub-lokalitě 1 VD Hracholusky. Terén zaměřený lidarem (světle modrá), měřícím člunem Joska (tmavě modrá) a echosounderem RiverSurveyor M9 (fialová) (vlastní tvorba, 2017).

Z výše uvedeného grafu je zřejmý rozdíl v průběhu terénu všech tří měření. Echosounder vykazuje celkově nižší nadmořské výšky, než vyplývají z Josky. To mohlo být způsobeno jednak vznikem chyby při konverzi dat nebo při převedení bodů

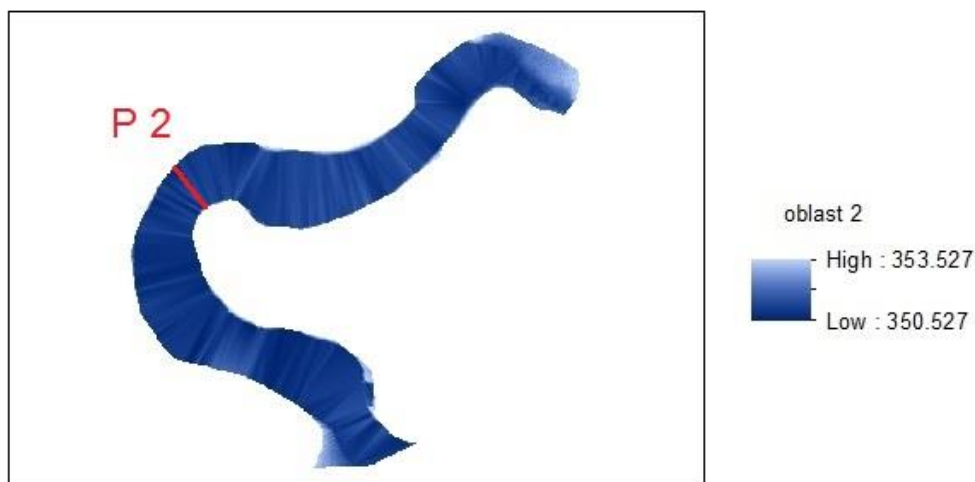
na TIN, protože obě bodové sady byly zaznamenány rozdílným způsobem snímání a jsou různě husté, čímž mohlo dojít ke zkreslení povrchu reprezentovaného nepravidelnou sítí trojúhelníků. Považujeme tedy za srovnávací měření data zaměřená Joskou, neboť se jedná o zdroj dat, jehož přesnost je garantovaná povodím Vltavy. Pro potřeby porovnání těchto metod bylo provedeno odečtení obou DMT – od lidarového měření bylo odečteno sonarové měření Joskou (za využití funkce Raster Calculator v ArcGIS).

Z obr. 32 v příloze je dobře patrné, že lidar zaměřil pouze místa podél břehů a v mělkých zónách, a proto v průběhu interpolace došlo ke zkreslení nadmořských výšek terénu ve zbylé oblasti, kterým byla přiřazena vyšší nadmořská výška (nižší hloubka vody) než je skutečná. Na obr. 22 je zobrazen rozdílový rastr, který vznikl po odečtení. Odchytky nadmořských výšek se pohybují v rozmezí od -1,13 až 19,47. V poměrně mělkých úsecích se nadmořské výšky obou metod téměř překrývají (zelená). Lidar byl schopen tyto místa zaměřit velmi dobře. V hlubších místech už je zřejmá větší odchylka nadmořských výšek (žlutá) a na konci úseku, kde již přechází zátočina ve vlastní VD Hracholusky m je odchylka obou DMT největší (červená). Tyto rozdíly vyplývají z interpolace, jsou výsledkem algoritmu, neboť zde vlivem absence bodů byly interpolovány nadmořské výšky, které odpovídají mělčinám v oblasti břehů.



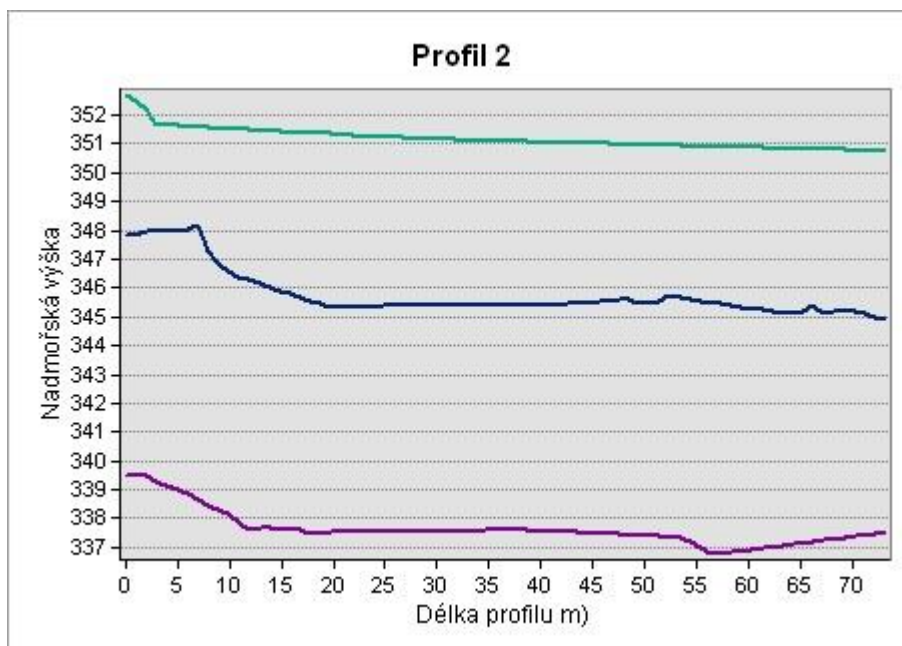
Obrázek 22. Rozdílový rastr vytvořený odečtením DMT z Josky od DMT z lidarů (vlastní tvorba, 2017).

V případě sub-lokalit 2 a 3 jsou výsledky dost podobné, liší se pouze konkrétní hodnoty nadmořských výšek. Po zpracování výsledků z první sub-lokality bylo rozhodnuto pro další sub-lokality porovnat DMT z lidarů pouze s DMT z měřícího člunu Joska, opět pomocí rozdílového rastru (od DMT z lidarů bylo odečteno DMT z Josky). Toto zobrazuje obr. 37 (pro sub-lokalitu 2) a obr. 38 (pro sub-lokalitu 3) v příloze.



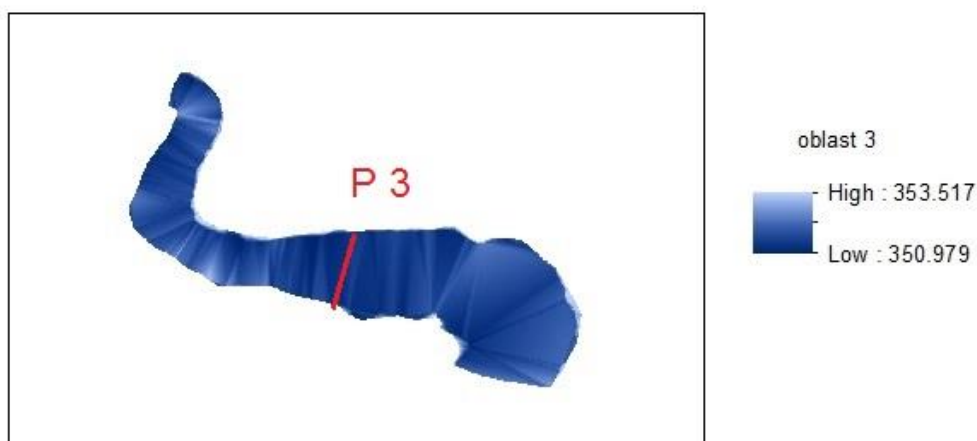
Obrázek 23. Digitální model terénu z lidarových dat sub-lokality 2 a vybraný příčný profil P2 (vlastní tvorba, 2017).

Sub-lokalitu 2 představuje zátočina tvořená Žebráckým potokem. Nadmořské výšky interpolované z dat získaných lidarovým měřením se pohybují v rozmezí okolo 353,53 až 350,53 m n. m. (obr. 23). Nadmořské výšky interpolované z dat získaných měřícím člunem Joska se pro tuto oblast pohybují od 352,10 do 337,70 m n. m. a měřícím zařízením RiverSurveyor M9 od 342,27 do 329,99 m n. m. Pro lepší vizualizaci byl vybrán příčný profil P2 (viz obr. 23), pro který byl zjištěn průběh nadmořských výšek dna zaměřeného jak lidarem, tak oběma sonarovými metodami, což zobrazuje graf na obr. 24. Z grafu je patrný velký rozdíl v průběhu terénu všech tří měření. Po odečtení DMT z Josky od lidarového měření byly získány odchylky nadmořských výšek, které se pohybují v rozmezí od 0,78 do 13,5 m. Menší odchylka je typická pro místa podél břehů a pro mělčiny, kde došlo k větší shodě obou DMT. Na obr. 37 v příloze tato místa představuje zelená barva. Odchylka roste s rostoucí hloubkou vody, což představuje žlutá až červená barva.



Obrázek 24. Příčný řez profilem P2 v sub-lokalitě 2 VD Hracholusky. Terén zaměřený lidarem (světle modrá), měřícím člunem Joska (tmavě modrá) a echosunderem RiverSurveyor M9 (fialová) (vlastní tvorba, 2017).

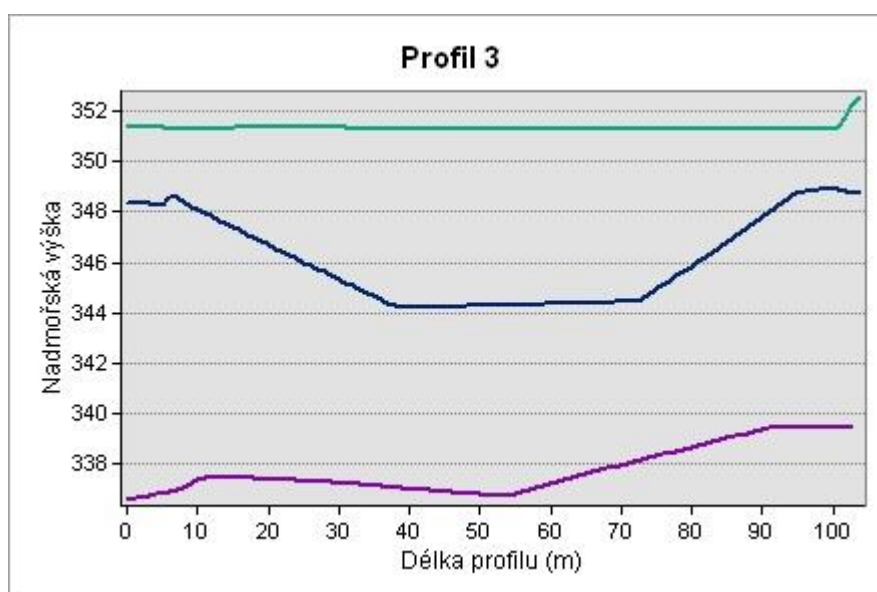
Sub-lokalita 3 je tvořena zátočinou Úterského potoka. Nadmořské výšky interpolované z dat získaných lidarovým měřením se pohybují od 353,52 do 350,98 (obr. 25). Nadmořské výšky interpolované z dat z Josky jsou v rozmezí od 351,63 do 342,75 m n. m. a z echosunderu RiverSurveyor M9 od 343,57 do 333,90 m n. m..



Obrázek 25. Digitální model terénu z lidarových dat sub-lokality 3 a vybraný příčný profil P3 (vlastní tvorba, 2017).

Pro lepší vizualizaci byl vybrán příčný profil P3 (viz obr. 25), pro který byl zjištěn průběh nadmořských výšek dna zaměřeného jak lidarem, tak oběma sonarovými

metodami, což zobrazuje graf na obr. 26. Opět je patrný velký rozdíl v průběhu terénu jednotlivých měření. V případě sub-lokality 3 se po odečtení obou DMT z lidaru a z Josky odchylka pohybuje v rozmezí -0,58 až 9,56 m. Na obr. 38 v příloze jsou zobrazeny oba DMT včetně rozdílového rastru. Z rozdílového rastru vyplývá, že menší odchylka je typická pro místa podél břehů a pro mělčiny, kde došlo k větší shodě obou DMT (zelená barva). Odchylka roste s rostoucí hloubkou vody, což představuje žlutá až červená barva.

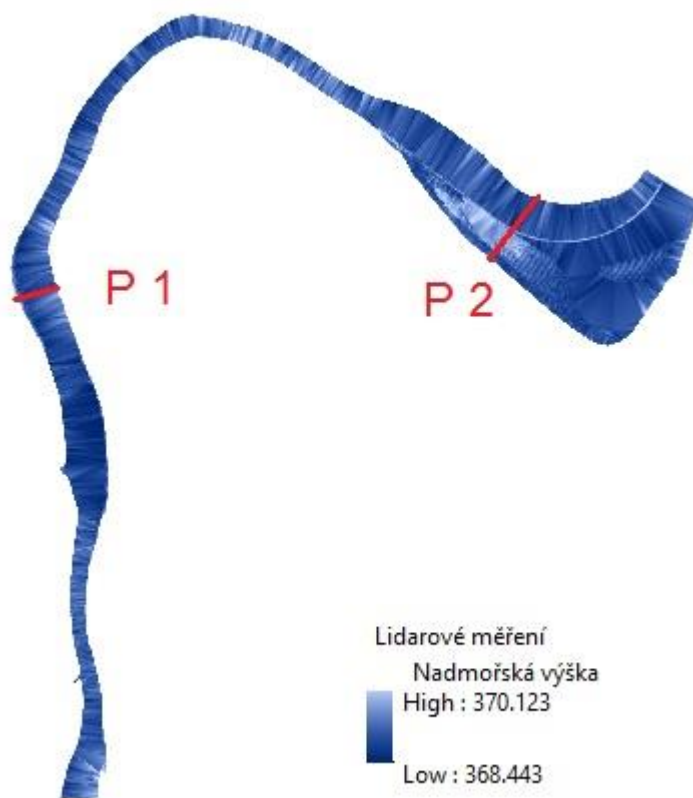


Obrázek 26. Příčný řez P3 v sub-lokalitě 3 VD Hracholusky. Terén zaměřený lidarem (světle modrá), měřícím člunem Joska (tmavě modrá) a echosunderem RiverSurveyor M9 (fialová) (vlastní tvorba, 2017).

Z bodových dat zaměřených leteckým laserovým skenováním nebylo možné vytvořit digitální model terénu pro VD Hracholusky v odpovídající kvalitě sonarového měření. Body byly zachyceny pouze v oblastech mělčin a podél břehů, ale body dna se téměř neobjevují v samotné nádrži, respektive v místech, kde je větší hloubka než zhruba 2,5 metru. Nadmořské výšky v oblasti mělčin (zhruba 353 – 350 m n. m.) se více méně shodují. Grafy na obrázcích 21, 24 a 26 zobrazují průběh terénu ve vybraných profilech P1, P2 a P3 pro dílčí sub-lokality. Z grafů je patrné, že terén získaný z dat leteckého laserového skenování je celkově nadhodnocený. Všechny tři profily P1, P2 a P3 zobrazující mračno bodů z lidaru jsou zobrazeny na obr. 39 v příloze.

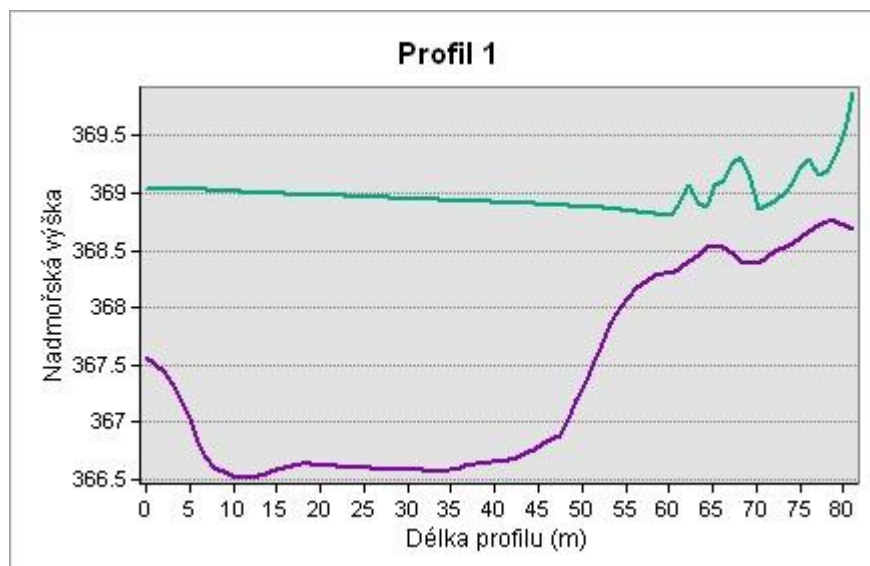
6.2 Vltava

Digitální model terénu z lidarových dat byl porovnán s digitálním modelem terénu ze sonarových dat získaných echosounderem RiverSurveyor M9. Oba DMT zájmového území jsou zobrazeny na obr. 40 v příloze. Nadmořské výšky interpolované z dat získaných lidarem se pohybují v rozmezí od 368,44 až 370,12 m n. m. (obr. 27), naproti tomu nadmořské výšky z dat získaných echosounderem se pohybují v rozmezí 365,17 do 368,98 m n. m. Největší hloubka zaměřená echosounderem je 3,96 m, oproti tomu lidar zaměřil maximální hloubku zhruba 1,5 m a hlouběji nepronikl. Jak je možné vidět z obr. 18, v délce celého úseku byly zaměřeny jen body podél břehů, pouze v rozšiřující se části v pravém meandru na konci úseku (v místě profilu P2) byly body rozmístěny hustěji, neboť se jedná o mělkou oblast.



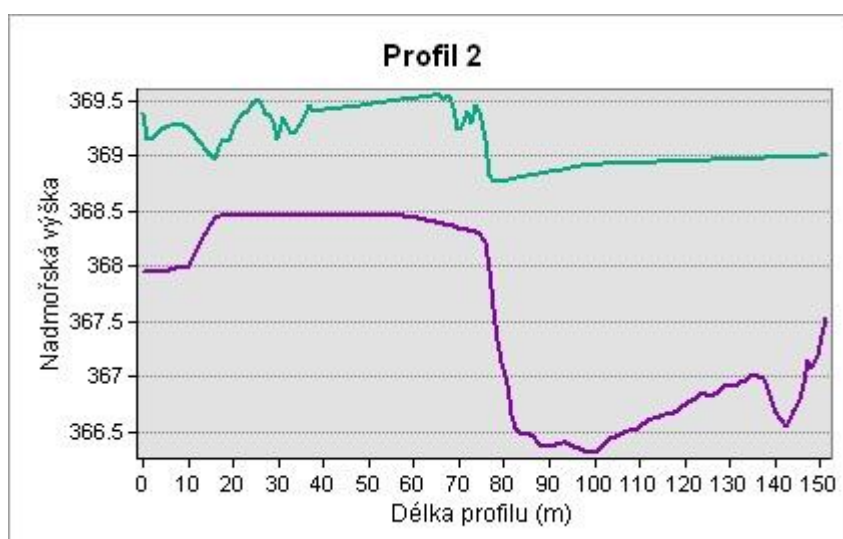
Obrázek 27. Schéma digitálního modelu terénu vybraného území řeky Vltavy vytvořeného na základě dat z leteckého laserového skenování (vlastní tvorba, 2017).

Pro lepší vizualizaci byly zvoleny dva příčné profily P1 a P2 (viz obr. 27). První profil se nachází v užší části řeky. Graf na obr. 28 zobrazuje průběh nadmořských výšek dna zaměřených lidarem a echosounderem. Z grafu vyplývá, že laserový paprsek nepronikl až na dno. V pravé části toku se zřejmě nachází mělčina, lidar zaznamenal rozdíly v hloubce. V příloze na obr. 43 je také možné vidět přesné rozmístění mračna bodů zachycených lidarem v tomto profilu.



Obrázek 28. Příčný řez profilem P1 vybraného úseku řeky Vltavy. Terén zaměřený lidarem (světle modrá) a echosounderem RiverSurveyor M9 (fialová) (vlastní tvorba, 2017).

Druhý profil P2 je situován v rozšiřujícím se meandru. Podrobněji tuto oblast zobrazuje obr. 42 v příloze, na kterém je snímek s rozmístěním zaměřených bodů. Je zde viditelná mělčina, ostrov a hlubší oblast. Graf na obr. 29 zobrazuje průběh nadmořských výšek dna zaměřených lidarem a echosounderem. Z grafu i z obrázku vyplývá, že mělčina a ostrov v levé části meandru byly zaměřeny přesně, nicméně v hlubší části toku je sonarové měření mnohem přesnější. V příloze na obr. 43 je také možné vidět přesné rozmístění mračna bodů zachycených lidarem v tomto profilu.



Obrázek 29. Příčný řez profilem P2 vybraného úseku řeky Vltavy. Terén zaměřený lidarem (světle modrá) a echosounderem RiverSurveyor M9 (fialová) (vlastní tvorba, 2017).

Pro potřeby porovnání byly DMT obou měření od sebe odečteny pomocí funkce Raster Calculator. Od DMT z dat získaných lidarovým měřením bylo odečteno DMT získané z dat ze sonarového měření. Výsledný rozdílový rastr je na obr. 41 v příloze. Odchylka se pohybuje v rozmezí od 0,03 do 4,14. Podél břehů se vyskytují místa, kde se obě měření příliš neliší (zelená barva), vesměs kopírují mělčiny či nánosy. V hlubších místech ve středu toku jsou odchylky větší (žlutá až červená). Z rozdílu mezi lidarovým a sonarovým měřením je patrné, že největší rozdíly se vyskytují v místech s větší hloubkou a naopak největší shoda je zaznamenána v oblasti mělčin a podél břehů. Lidar byl schopen tyto místa zaměřit velmi dobře. Na obr. 41 je přiblížen také detail pravé zatáčky s ostrůvkem a mělčinou. Odchylka je velmi malá, převažuje zelená, což potvrzuje přesné měření lidarů v oblasti mělčin.

Po porovnání rozdílů DMT je zřejmé, že se tyto metody nedají srovnávat. V případě lidarů interpolované nadmořské výšky jsou nadhodnocené v důsledku toho, že interpolace měla k dispozici body pouze z mělkých oblastí a ostrůvků, tedy celkově s větší nadmořskou výškou (zaměřila i místa, která sonar nemohl změřit vlivem malé hloubky). Naopak echosounderem byly zaměřeny i hloubky ve středu toku, proto má výsledný interpolovaný terén celkově nižší nadmořské výšky, avšak je přesnější.

7. Diskuze

V současnosti se ve světě vyvíjí batymetrické lidarové systémy pro mapování mělkých vod. Tato práce se zabývá ověřením použitelnosti mapování batymetrie duálním lidarem Riegl VQ-880-G v podmínkách ČR. Kdyby se prokázalo, že přesnost měření je srovnatelná se sonarovým měřením, pak by tato metoda byla do budoucna velmi perspektivní a ulevila by ve všech ohledech. Jedná se o rychlé a komplexní topo – batymetrické mapování dna mělkých vod.

Pro mapování zemského povrchu se letecké laserové skenování používá běžně. Také pro mapování dna oceánů a moří jsou laserové skenery známy již od 60. let 20. století. Přesnost měření je dostačující pro hloubky až do padesáti metrů pro potřebné aplikace, nicméně pro mělké vody (do 10 m) je takovéto měření nepřesné a omezené, přesnost je nedostačující (Steinbacher a kol, 2010). To vede ke snahám vyvinout nové a přesnější batymetry určené pro mělké vody. V současnosti se ve světě při mapování mělkých vod dosahuje velkých pokroků. Společnost Riegl Laser Measurement Systems se dlouhodobě věnuje problematice měření v mělkých vodách. Ve spolupráci s Univerzitou v Innsbrucku v roce 2011 představili první letecký laserový skener primárně vyvinutý pro hydrografický výzkum v oblasti mělkých vod, Riegl VQ-820-G. Podle nich má systém velký potenciál pro dosažení současných i budoucích požadavků sběru dat ve vysokém rozlišení, velké kvalitě, rychlou a ekonomicky výhodnou cestou (Steinbacher a kol, 2010). Pilotní měření proběhlo v únoru 2011 na malém rybníku v záplavové oblasti Dunaje. Maximální hloubka rybníku 4 m byla úspěšně zaměřena. Při měření byla dosažena vysoké hustota až 50 bodů na m², což bylo dáno nízkou výškou letu (125 m) a malou rychlostí letu (Mandlbürger a kol, 2011). Další test proběhl v červenci 2011 na řece Loisach v Německu. Řeka byla zvolena pro své komplexní vlastnosti a měnící se různé podmínky. Při výšce letu 500 m bylo dosaženo hustoty 10 – 25 bodů na m². Dny náletu byly pečlivě vybírány s optimální kvalitou vody. Dosažená hloubka, opět okolo 4 m, odpovídala 1 Secchiho hloubce. Zde se však jedná o průzračnou alpskou řeku s dobrou viditelností až na dno (Steinbacher a kol, 2012).

V roce 2014 byla představena nová verze Riegl VQ-880-G a byla testována v červnu 2015 na několika lokalitách v USA v různých podmínkách, kvalitě vody a hloubce. S výsledky byli autoři velmi spokojeni, osvědčil se jak v čisté mořské vodě, tak ve znečištěných vnitrozemských vodách, kde by data nemohla být sebrána žádným jiným zařízením. Kromě toho, systém umožňuje online zpracování dat, což znamená, že jsou analyzována v reálném čase přímo uvnitř zařízení (Pfennigbauer, 2015a), což by mělo usnadnit zpracování dat a zvýšit přesnost měření. Také by to

mělo řešit problém, kdy je těžké odlišit od jednotlivých odrazů od hladiny vody, ode dna a od masy vodního sloupce, zejména v mělkých vodách (Mandlbauer a kol, 2015). Pfennigbauer (2015a) uvádí, že laserový skener je během 1 pulsu schopen zachytit až 7 cílů, tedy např. když nad hladinou visí vegetace, přístroj by měl být schopen doručit odrazy jak vegetace, tak hladiny i dna. Ke zpracování těchto odrazů dojde online v reálném čase, což snižuje dobu zpracovávání dat pro uživatele a navíc stále umožňuje následné manuální zpracování dat (Pfennigbauer, 2015a).

Z výše zmíněných informací vyplývá, že přístroj je plně vybaven pro mapování mělkých vod, dokonce i řek při vyšším znečištění. Výsledky diplomové práce tomu neodpovídají a vykazují něco jiného. U nás bylo zaměřeno několik lokalit, z nichž byly pro tuto DP vybrány dvě – VD Hracholusky a úsek řeky Vltavy v Hluboké nad Vltavou. V obou případech lidar nebyl schopen proniknout až na dno, byly zaměřeny pouze body podél břehů a mělké oblasti, kde na dno pronikl. Dosažená hloubka na VD Hracholusky se pohybuje okolo 2,5 m, v mělčích místech s rovnějším dnem až do 4 m a v případě Vltavy je to okolo 1,5 m. Je zřejmé, že měření nevyšlo ani v oblasti VD Hracholusky, což by se dalo odůvodnit příliš velkou hloubkou nádrže, ale ani pro Vltavu, v relativně malých hloubkách. Pro měření lidarem VQ-820-G je udána maximální měřitelná hloubka v rozsahu 1 Secchiho hloubky. Mandlbauer a kol (2011) a Steinbacher a kol (2011) uvádí běžně dosaženou hloubku 4 m. Doneus a kol (2013 a 2015) dokonce při archeologickém mapování na ostrově Sv. Petar v Chorvatsku dosáhli hloubky až 8 m a při mapování v Kolone až 11 m. Nicméně zde se jednalo o průzračnou mořskou vodu se světlým dnem a Secchiho hloubka odpovídala zaměřeným hodnotám. Pro lidar VQ-880-G je uváděna maximální měřitelná hloubka do 1,5 Secchiho hloubky (Riegl, 2016). Při mapování v USA byla dosažena dokonce hloubka až 30 m v čisté mořské vodě (Pfennigbauer, 2015b). Obecně tedy platí pravidlo „co je vidět, to je měřitelné“. Přijatelná viditelnost ve vodě je základní podmínkou pro průnik laserového paprsku vodou (Steinbacher a kol, 2010). Zákal způsobuje rozložení signálu na suspendované částice a zeslabuje odražený signál, tím omezuje efektivní rozsah hloubky (Steinbacher a kol, 2012). Autoři (Steinbacher a kol, 2010) ještě rozlišují mezi znečištěním způsobeným usazenými částicemi (anorganické, organické částice, organismy) nebo pohyblivými se sedimenty. Pokud se jedná o usazené částice, je možné poměrně snadno odlišit jejich odraz od odrazu ode dna, naproti tomu u pohyblivých se částic je mnohem těžší separovat jednotlivé náhodné odrazy způsobené částicemi, od odrazů ode dna. Případně mohou být dokonce zaměněny za odraz ode dna. Kromě toho, pokud sedimenty tvoří celistvou

vrstvu znečištění v toku nebo v nádrži, laserový paprsek není schopen proniknout na dno vůbec.

Autoři se shodují, že průzračnost vody a čistota společně se světlym reflexním dnem jsou hlavními limitujícími faktory. Neschopnost průniku na dno v našich podmínkách tedy bude patrně způsobena vysokým obsahem splavenin. Zejména v případě Vltavy, která je sice mělká, ale říční dno vybraného úseku má tmavou barvu a vysoký obsah organických látek, tyto podmínky omezily možnost batymetrického laseru lépe zaměřit dno. V případě VD Hracholusky se také jedná o kalnou neprůzračnou vodu a navíc větší hloubky.

Problém splavenin může být redukován vhodně zvolenou dobou náletu. Data pro DP pochází z náletu, který se uskutečnil dne 25.4.2016, což je sice vhodný termín pro nalétávání terénu lidarovým měřením, avšak pro batymetrické měření duálním lidarem naprosto nevhodný. Největší průzračnost vody je dosažena v zimním období, naopak na jaře dochází ke zvýšení průtoků vlivem tání sněhové pokrývky. Tím se zvyšuje také splaveninový režim toku, a tedy i znečištění, zákal v toku (v nádrži). Duální lidar tedy nebyl schopen proniknout kalnou vodou až na dno. Otázkou zůstává, jestli by bylo dosaženo lepších výsledků, kdyby byly zájmové lokality zmapovány během zimních měsíců, nebo by stále zůstávala kvalita vody nedostačující. Při sbírání bodů během zimních měsíců se objevuje další faktor, na který je třeba dát si pozor a to, že laserový paprsek není schopen proniknout ledem, jak uvádí Mandlbürger a kol (2011). Průnik vodou mohou také ohrozit vlny na hladině vody, které ovlivňují její odrazivost paprsku a mění směr lomu (Steinbacher a kol, 2010). Je tedy nutné pro měření pečlivě volit den s optimální kvalitou vody a povětrnostními podmínkami. V době náletu zájmových lokalit byla vysoká vlhkost a občasné se vyskytující déšť se sněhem. Samotný padající sníh a déšť zároveň působil i jako šum naskenovaný v mračnecích bodů (nejvíce v lokalitě VD Hracholusky). To je další faktor, který ovlivnil mapování zájmových lokalit.

Porovnejme nyní výsledky s měřením ve srovnatelných podmínkách. Doneus a kol (2015) provedli v březnu 2013 měření dvou lokalit pro svůj archeologický výzkum. Jedna z nich v Chorvatsku, kde dosáhl dokonce 11 m a druhá pro vytvoření kontrastu v Rakousku na jezeru Keutschach. Kvalita vody je zde sice vysoká, nicméně voda je kalná. Při tomto měření se jim podařilo dosáhnout pouze do hloubky 1,6 m, tedy obdobně jako při měření úseku Vltavy a VD Hracholusky. Měření na alpských řekách Loisach a Pielach se nedají srovnávat s našimi řekami, neboť se jedná o čisté, průzračné řeky s minimálním množstvím znečištění a splavenin (Steinbacher a kol, 2012; Mandlbürger a kol, 2015).

Cílem bylo posoudit vhodnost metody batymetrie duálním lidarem pro naše podmínky. Byly vytvořeny digitální modely terénu obou zájmových lokalit (VD Hracholusky musely být rozděleny na tři dílčí sub-lokality, viz kap. 6.1) a následně porovnány s DMT vytvořenými ze srovnávacích sonarových dat. Z obr. 17 a 18 je vidět rozložení dat nasnímaných laserovým skenerem. Je jasné, že vzniklé interpolované povrchy jsou jen výsledky algoritmu interpolační metody, která neměla k dispozici přesná data, ze kterých by mohla vycházet. Digitální modely terénu jsou tedy velmi nepřesné. Nicméně problém není v nedostatku zaměřených bodů lidarem, ale v jejich nevhodném rozmístění. Všechny body jsou shluklé v oblasti, kde je malá hloubka umožňující proniknout na dno. Bodů je tedy dostatek, i hustota je vysoká, pouze však v oblastech malé hloubky. Uprostřed vzniklo „mrtvé“ místo z důvodu neprůchodnosti kalnou vodou. Za těchto podmínek je metoda zjišťování hloubek pomocí leteckého laserového skenování nepoužitelná, nelze stanovit relevantní model terénu.

Pro další výzkum doporučuji pečlivě volit den náletu s odpovídajícími podmínkami kvality vody – v zimním období, kdy je v našich podmínkách voda nejčistší, není ovlivněna průtokem z tání sněhu a zaměřovaná lokalita není pokryta ledem. Hladina musí být klidná, bez vln. Ideální je dobrá viditelnost, beze sněhu, deště a silného větru. Další možností je použít jiný typ lidaru, např. Leica HawkEye III, který disponuje dvěma paprsky o vlnové délce 532 nm, jeden pro mělké a druhý pro hlubší vody a tudíž by mohl dosáhnout na dno, ovšem za předpokladu snížené přesnosti (Doneus a kol, 2015). Jinou možností je soustředit se na měření jen opravdu mělkých lokalit, kde Secchiho hloubka odpovídá maximální hloubce. Za těchto podmínek by výsledky z lidaru přinesly velmi přesné hodnoty v minimálním čase. Navíc v těchto místech může být znemožněno měření echosoundery vlivem příliš mělké vody. Pro vodní toky, jako je Vltava a vodní nádrže, jako VD Hracholusky, je stále spolehlivější metodou měření pomocí echosounderu RiverSurveyor M9.

8. Závěr

Metody mapování batymetrie vodních nádrží a řek se v průběhu času vyvíjí. Vychází z principů pocházejících již ze starověku. V počátcích byla hloubka zjišťována olovníci zavěšenou na laně, později se vyvinuly měřicí přístroje založené na akustice a optice. Cílem práce bylo popsat vývoj vědního oboru batymetrie a blíže přiblížit metody leteckého laserového skenování a lidary. V praktické části byl posuzován potenciál aplikace měření hloubek pomocí leteckého laserového skenování v podmínkách ČR. Byly vybrány dvě lokality – VD Hracholusky a úsek řeky Vltavy v Hluboké nad Vltavou, pro které byla zaměřena batymetrická data pomocí laserového skeneru Riegl VQ-880-G. Z těchto dat byly vytvořeny digitální modely terénu obou zájmových lokalit, jejichž přesnost byla následně porovnávána se srovnávacími daty, které představuje sonarové měření echosounderem RiverSurveyor M9, v případě VD Hracholusky také z měřicího člunu Joska.

Laserový skener Riegl VQ-880-G patří v současnosti k nejmodernějším a nejkomplexnějším topo – batymetrickým systémům zaměřeným na mapování mělkých vod. Od klasických duálních lidarů zaměřených na hlubinnou batymetrii se liší zejména tím, že využívá krátké a úzké laserové paprsky (o vlnové délce 532 nm), s vysokou pulsní opakovací frekvencí (PRF) a nižší energií. Díky tomu systém zajišťuje velmi přesné mapování ve vysokém rozlišení od přibližně 0,25 m až do 1,5 Secchiho hloubky (Mandlbürger a kol, 2011).

V případě zájmových lokalit byl lidarem úspěšně zaměřen terén i hladina vody, nicméně laserový paprsek nebyl schopen proniknout až na dno a byly zaměřeny pouze oblasti mělčin a podél břehů. Dosažené hloubky v lokalitě Vltava se pohybují okolo 1,5 m a v lokalitě VD Hracholusky okolo 2,5 m, ojediněle až 4 m. Výsledky měření jsou ovlivněny splaveninovým režimem v nádrži a v toku, který znemožňuje proniknutí laserového paprsku na dno. Pro mapování tímto systémem je podmínkou odpovídající kvalita vody. V důsledku toho byly zaměřeny body pouze v mělčinách a v oblasti břehů. Tím docházelo k vysokému nadhodnocení nadmořských výšek oproti skutečným hodnotám.

Stanoveným cílem bylo vytvoření digitálních modelů terénu obou lokalit a jejich porovnání se srovnávacími daty. Z dosažených výsledků vyplývá, že batymetrická data zaměřená leteckým laserovým skenováním nejsou vhodná pro modelování digitálních modelů terénu v podmínkách typických pro české řeky a vodní nádrže. Metoda by se mohla uplatnit v případě mělkých a velmi průzračných vod s minimálním splaveninovým režimem. Umožňuje např. mapování biotopů v litorálních zónách. Za

předpokladu, že aktuální Secchiho hloubka lokality odpovídá maximální hloubce naměřené, se jedná o velmi přesnou a rychlou metodu.

Ve světě je měření laserovým skenerem Riegl VQ-880-G a obdobnými systémy na vzestupu. Odborníci se shodují na pozitivních výsledcích a věří, že tato metoda přináší kvalitnější a přesnější data rychlejší cestou za minimálních ekonomických nákladů. Data lze uplatnit zejména pro hydrologické modelování, mapování biotopů, monitoring splaveninového režimu nebo pro archeologický výzkum.

Přínosem práce je ověření potenciálu metody v podmínkách České republiky. Bylo zjištěno, že za současných podmínek je metoda zjišťování hloubek pomocí leteckého laserového skenování nepoužitelná, nelze stanovit relevantní model terénu. Z dosažených výsledků je možno vyvodit další cíle, zamyslet se nad možností zlepšení měření a soustředit se na jiné metody měření hloubek, které jsou vhodnější pro naše podmínky. Přínosem práce je také zpracování batymetrických dat, která byla zaměřena jedním z nejmodernějších laserových skenerů současnosti a podrobný popis výsledků měření kterých bylo dosaženo a postupu jejich zpracování. Výsledky práce mohou být uplatněny během dalšího výzkumu v rámci projektu TA ČR.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

- Agassiz A., 1888: Three cruises of the United States coast and geodetic survey Steamer BLAKE, Houghton, Mifflin and Company, Boston, 314 s.
- Allouis T., Bailly J.-S., Pastol Y., Le Roux C., 2010: Comparison of lidar waveform processing methods for very shallow water bathymetry using raman, near-infrared and green signals. *Earth surface processes and landforms* 35: 640 – 650.
- Baltsavias E. P., 1999: A comparison between photogrammetry and laser scanning. *Journal of photogrammetry and remote sensing* 54: 83 – 94.
- Bhargava N., Bhargava R., Tanwar P. S., 2013: Triangulated Irregular Network model from mass points. *International Journal of Advanced Computer Research* 3: 172 – 176.
- Brázdil K., 2009: Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. *Geodetický a kartografický obzor* 55/97, číslo 7: 145 – 151.
- Broža V., 2005: Přehrady Čech, Moravy a Slezska. *Knihy 555*, Liberec, 256 s.
- Burrough P. A., McDonnell R. A., 1998: Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford, 332 s.
- Broža V. [ed], 2011: Přehrady v České republice 2010: Rekonstrukce, modernizace, sanace, opravy. Český přehradní výbor, Praha, 103 s.
- Carter J., Schmid K., Waters K., Betzhold L., Hadley B., Mataosky R., Halleran J., 2012: Lidar 101: An introduction to lidar technology, data and applications. NOAA Coastal services center, Charleston, 72 s.
- Caruso C., Quarta F., 1998: Interpolation methods Comparison. *Computers Math. Application* 35/12: 109 – 126.
- Česák J., Šobr M., 2005: Metody batymetrického mapování českých jezer. *Geografie – Sborník české geografické společnosti* 110: 141 – 151.
- ČHMÚ, 2008: Mapy charakteristik klimatu. Český hydrometeorologický ústav, Praha, online: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mapy-charakteristik-klimatu>, cit. 22.2.2017.
- ČHMÚ, 2017: Evidenční list hlásného profilu VD Hracholusky. Český hydrometeorologický ústav – hlásná a předpovědní služba, Praha, online: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=307267, cit. 22.2.2017.
- ČHMÚ, 2017b: Hlásná a předpovědní povodňová služba – Evidenční list hlásného profilu České Budějovice a Praha (Chuchle). Praha, online: <http://hydro.chmi.cz/hpps/>, cit. 27.2.2017.

- ČHMÚ Brno, 2017: ADCP RiverSurveyor M9. Český hydrometeorologický ústav – Pobočka Brno, Oddělení hydrologické přístrojové techniky, online: <http://www.chmibrno.org/CZ/pristroje.php>, cit. 9.4.2017.
- ČÚZK, 2010: Výškopisná data Zeměměřického úřadu. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(artmcdct2nfbd1y0tr2qqbn1\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&menu=30](https://geoportal.cuzk.cz/(S(artmcdct2nfbd1y0tr2qqbn1))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&menu=30), cit. 4.2.2017.
- Deacon G. E. R. [ed], 1962: Seas, maps, and men; an atlas-history of man's exploration of the oceans. Doubleday and Company, Inc., Garden City, New York, 297 s.
- Dierssen H. M., Theberge A. E., 2014: Bathymetry: History of seafloor mapping. Encyclopedia of Natural Resources. Volume II – Water and Air, str 1 – 6.
- Dolanský T., 2004: Lidary a letecké laserové skenování. Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem, 100 s.
- Elhassan I., 2015: Development of bathymetric techniques. FIG working week 2015 – From the Wisdom of the ages to the challenges of the modern world (17. – 21. 5. 2015), Sofia, 14 s.
- Emery W. J., Thomson R. E., 1998: Data analysis methods in physical oceanography. Elsevier, Michigan, 634 s.
- ESRI, 2012a: An overview of the interpolation toolset. ArcGIS Resources, online: [http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z0000006900000000](http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000690000000), cit. 17.2.2017.
- ESRI, 2012b: What is a TIN surface? ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//006000000001000000>, cit. 17.2.2017.
- Fernando-Diaz J. C., Glennie C. L., Carter W. E., Shrestha R. L., Sartori M. P., Singhanian A., Legleiter C. J., Overstreet B. T., 2014: Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single – wavelength airborne lidar sensor. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing 7: 623 – 635.
- Fiala J., Keder J., Macoun J., Livorová H., Kurfürst P., Srněnský R., Horálek J., Novák V., Ostatnická J., Skořepová I., Zapletal M., Chroust P., Skybová M., Hřivnáčová G., Fara M., Hůnová I., 2000: Vyhodnocení připravenosti ČR splnit požadavky na kvalitu ovzduší podle směrnic EU a Konvence LRTAP. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 22 s.

- Fugro, 2017: Laser Airborne Depth Sounder (LADS). Fugro, Leidschendam, online: <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/innovations/laser-airborne-depth-sounder-lads#tabbed1>, cit. 17.3.2017.
- Garmin, 2000: Fishfinder 240 owner's manual. Garmin, online: <http://sonar.ru/manuals/download/english/garmin/f240.pdf>, cit. 17.11.2016.
- Geology, 2017a: Geologické mapy Hracholusk nade Mží k prohlížení on-line. Geologické a geovědní mapy, online: http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g50&y=837300&x=1063600&s=1, cit. 15.4.2017.
- Geology, 2017b: Geologické mapy Hluboká nad Vltavou k prohlížení on-line. Geologické a geovědní mapy, online: http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g50&y=757600&x=1157200&s=1 cit. 15.4.2017.
- Georeal, 2016: Detailní popis postupu zpracování leteckého batymetrického měření. Georeal s r. o., Plzeň, 41 s.
- Gojda M., John J., Starková L., 2011: Archeologický průzkum krajiny pomocí leteckého laserového skenování – Dosavadní průběh a výsledky prvního českého projektu. Archeologické rozhledy 63: 680 – 698.
- Gojda M., John J., 2013: Principy leteckého laserového skenování a jeho využití pro dálkový archeologický průzkum. In: M. Gojda, J. John a kol: Archeologie a letecké laserové skenování krajiny, s. 8–20.
- Gordon R. L., 1996: Acoustic Doppler Current Profilers - Principles of operation: A practical primer. RD Instruments, San Diego, 57 s.
- Guenther G. C., Cunningham A. G., LaRocque P. E., Reid D. J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. EARSeL Proceeding, Dresden, 27 s.
- Guerrero M., Rütther N., Szupiany R., Haun S., Baranya S., Latosinski F., 2016: The acoustic properties of suspended sediment in large rivers: Consequences on ADCP method applicability. Water 8: 13 – 25.
- Gunawan B., Sterling M., Knight D. W., 2010: Using an acoustic Doppler current profiler in a small river. Water and Environment Journal 24: 147 – 158.
- Hanjiang X. Limin T., Long 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 37: 83 – 86.
- Harrison A. J. M., 1972: Depth measurement by leadline in flowing water. The Dock & Harbor Authority 53: 622.

- Hilldale R. C., Raff D., 2008: Assessing the ability of airborne Lidar to map river bathymetry. *Earth surface processes and landforms* 33: 773 – 783.
- Hradilek V., Bašta P., Vizina Š., Máca P., Pech P., 2015: Verification of remote sensing data for measuring bathymetry on small water reservoirs. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM – Section photogrammetry and remote sensing (18.6.2015), Sofia, s. 1219 – 1226.
- Irish J. L., Lillycrop W. J., 1999: Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. *Journal of photogrammetry and remote sensing* 54: 123 – 129.
- Irish J. L., McClung J. K., Lillycrop W. J., 2000: Airborne lidar bathymetry – The SHOALS system. JALBTCX, Alabama, online: http://www.wamis.go.kr/down/Irish_McClung_Lillycrop_00.pdf, cit. 17.3.2017.
- Ismail Z., Abdul Khanan M. F., Omar F. Z., Abdul Rahman M. Z., Mohd Salleh M. R., 2016: Evaluating error of lidar derived DEM interpolation for vegetation area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42: 141 – 150.
- Jánský B., Šobr M., 2003: Jezera České republiky. Přírodovědecká fakulta UK v Praze, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, 170 s.
- Jourdin F., Tessier C., Le Hir P., Verney R., Lunven M, Loyer S., Lusven A., Filipot J. – F., Lepesqueur J., 2014: Dual frequency ADCPs measuring turbidity. *Geo Marine letters* 34: 381 – 397.
- Kozaczka E., Grelowska G., Kozaczka S., 2010: Images of the seabed of the Gulf of Gdansk obtained by means of the parametric sonar. *Acta Physica Polonica A* 118: 91 – 94.
- Krtička L., 2007: Úvod do kartografie. Ostravská univerzita, Ostrava, 87 s.
- Lekkerkerk H. J., Theijs M. J. [eds], 2011: Handbook of offshore surveying. Skilltrade, Voorschoten, 221 s.
- Leica Geosystems, 2017: Leica Chiroptera II and HawkEye III – for deep and shallow water surveys. Leica Geosystems, online: <https://www.hydro-international.com/files/b6ad2063452fba3a79bb9274ffea5873.pdf>, cit. 17.3.2017.
- Li Z., Zhu Q., Gold Ch., 2005: Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC Press, New York, 324 s.
- Manbachi A., Cobbold R. S. C., 2011: Review – Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection. *Ultrasound* 19: 187 – 196.

- Mandlbürger G., Pfennigbauer M., Steinbacher F., Pfeifer N., 2011: Airborne hydrographic lidar mapping – potential of a new technique for capturing shallow water bodies. 19th International Congress on Modelling and Simulation (12. – 16.12.2011), Perth, 7 s.
- Mandlbürger G., Hauer Ch., Wieser M., Pfeifer N., 2015: Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats – A case study at the Pielach river. *Remote Sensing* 7: 6160 – 6195.
- Morlock S. E., 1996: Evaluation of Acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge. U. S Geological Survey, Indianapolis, 41 s.
- Mueller D. S., Wagner Ch. R., 2009: Measuring discharge with Acoustic Doppler current profilers from a moving boat. U. S. Department of the interior and U. S. Geological Survey - Techniques and Methods 3A-22, Reston, 72 s.
- MZ, 2016: Vodní rámcová směrnice 2000/60/ES. Ministerstvo zemědělství, online: <http://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/ochrana-vody/vodni-ramcova-smernice/>, cit. 17.1.2017.
- Novák P., Roub R., Vybíral T., Hlaváček J., Hejduk T., Bureš L., Reil A., 2015: Nové technologie batymetrie vodních toků a nádrží. *Vodní hospodářství* 65: 13 - 20.
- Oberg K. A., Mueller D. S., 1994: Recent applications of acoustic Doppler current profilers, ASCE, Reston, 341–350 s.
- Optech, 2011: Aquarius. Optech, Toronto, online: http://www.apiroter.com/products/optech/images/asp/ls/specification_aquarius.pdf, cit. 17.3.2017.
- Optech, 2012: Lidar Bathymetry – Product history. Optech, Toronto, online: <http://pdf.directindustry.com/pdf/optech/lidar-bathymetry/25132-387523.html>, cit. 17.3.2017.
- Pan Z., Glennie C., Hartzell P., Fernandez-Diaz J. C., Legleiter C., Overstreet B., 2015: Performance assessment of high resolution airborne full waveform LiDAR for shallow river bathymetry. *Remote Sensing* 7: 5133 – 5159.
- Panhalkar S., Jarag A. P., 2016: Assessment of spatial interpolation techniques for river bathymetry generation of Panchanga River basin using geoinformatic techniques. *Asian Journal of Geoinformatics*, 15/3: 9 – 15.
- Parsons D. R., Jackson P. R., Czuba J. A., Engel F. L., Rhoads B. L., Oberg K. A., Best J. L., Mueller D. S., Johnson K. K., Riley J. D., 2012: Velocity mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth surface processes and landforms*, 38: 1244 – 1260.

- Patera A., 2002: Nádrže a vodohospodářské soustavy 20: malá antologie environmentálních textů ve vodním hospodářství. ČVUT, Praha, 243 s.
- Pfennigbauer M., Steinbacher F., Ullrich A., Aufleger M., 2010: A novel approach to laser-based hydrographic data acquisition. ELMF - European Lidar Mapping Forum (30.11. – 1.12.2010), Hague, 8 s.
- Pfennigbauer M., 2015a: Next-generation airborne laser scanning system. Lidar magazine 8: 15 – 18.
- Pfennigbauer M., 2015b: Report on latest performance tests with the RIEGL VQ-880-G topo – bathymetric laser scanner. Hydro 2015 Proceedings (e-book): 57 – 63, online: http://www.hydroconferences.org/documents/hydroconferences/downloads/6/isbn978-0-620-68194-0_hydro2015_proceedings.pdf, cit. 24.3.2017.
- Plánka L., 2014: Kartografie I. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 208 s.
- Pokorná M., 2006: Mapování mořského dna v oblasti Porkupinské pánve. Geodetický a kartografický obzor 52 (94): 25 – 32.
- PV, 2013: Vyměřovací loď Valentýna II. Povodí Vltavy, s. p., online: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vymerovaci-lode/valentyna>, cit. 15.12.2016.
- PV, 2013b: VD Hracholusky. Povodí Vltavy, s. p., online: <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/hracholusky.pdf>, cit. 22.2.2017.
- PV, 2013c: Měřicí člun Joska. Povodí Vltavy, s. p., online: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vymerovaci-lode/joska>, cit. 11.3.2017.
- Quadros N. D., 2013: Unlocking the characteristics of bathymetric lidar sensors. Lidar Magazine 3: 1 – 4.
- RD Instruments, 1997: Broadband acoustic doppler current profiler, Patent US 5615173 A, online: <https://www.google.com/patents/US5615173>, cit. 2.1.2017.
- Riegl, 2015: RIEGL VQ-820-G. Riegl Laser measurements systems GmbH, Horn, online: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/DataSheet_VQ-820-G_2015-03-24.pdf, cit. 17.1. 2017.
- Riegl, 2016: RIEGL VQ-880-G. Riegl Laser measurements systems GmbH, Horn, online: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/DataSheet_VQ-880-G_2016-09-16.pdf, cit. 17.3.2017.

- Richardson J. J., Moskal L. M., 2014: Assessing the utility of green lidar for characterizing bathymetry of heavily forested narrow streams. *Remote sensing letters* 5: 352 – 357.
- Salous S., 2013: Radio propagation measurement and channel modelling. John Wiley and Sons Inc., Chichester, 399 s.
- SeaBeam, 2000: Multibeam sonar – Theory of operation. L-3 Communications SeaBeam Instruments, Washington, online: <https://www.ideo.columbia.edu/res/pi/MBSystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>, cit. 28.11.2016.
- Simpson M. R., 2001: Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler. U. S. Geological survey, Sacramento, 134 s.
- SonTek, 2015: RiverSurveyor S5/M9. SonTek, San Diego, online: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-M9-14>, cit. 9.4.2017.
- SonTek, 2010: RiverSurveyor S5/M9 System manual firmware version 1.0. SonTek YSI Inc., San Diego, 141 s.
- Steinbacher F., Pfennigbauer M., Ullrich A., Aufleger M., 2010: Airborne hydromapping: Area-wide surveying of shallow water areas. International society for photogrammetry and remote sensing congress, Calgary, 5 s.
- Steinbacher F., Pfennigbauer M., Aufleger M., Ullrich A., 2012: High resolution airborne shallow water mapping. International society for photogrammetry and remote sensing 39: 55 – 60.
- Steinberg S. J., 2009: Bathymetric Mapping. *CSU Geospatial Review* 7: 4.
- Stránský J., 2010: Přehradý Čech, Moravy s Slezska- průvodce. Nakladatelství Květa Vinklátová – KNIHY 555, Liberec, 208 s.
- Šíma J., 2016: Základní báze geografických dat (ZABAGED) – dílo jedné generace českých zeměměřičů. *Geodetický a kartografický obzor* 62/104, číslo 4: 73 – 84.
- Šobr M., 2003: Nová batymetrická měření šumavských jezer. *Geomorfologický sborník* 2: 115 – 120.
- Theberge, A. E., 1989: Sounding pole to sea beam. *Technical Papers/ASPRS-ACSM Annual Convention: Surveying and Cartography* 5: 334-346.
- Tanner, Z. L., 1903: General description of the Tanner navigational sounding apparatus with directions for use. Harvard University, Washington, 21 s.
- TO, 2017: Coastal and marine systems. Teledyne Optech, Toronto, online: <http://www.teledyneoptech.com/index.php/products/airborne-survey/coastal-marine-systems/>, cit. 8.1.2017.

- USGS, 2016: Experimental advanced airborne research lidar (EAARL). U. S. Geological Survey, Washington online: <https://coastal.er.usgs.gov/lstrm/tech/tech1-earl.html>, cit. 17.3.2017.
- Wille, P. C., 2005: Sound images of the ocean in research and monitoring. Springer, New York, 471 s.
- WHOI, 2014: Instruments – Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, online: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=819>, cit. 2.1.2017.

10. Přílohy

	Fugro LADS Mk3	Optech SHOALS 3000	Optech SHOALS 1000T	Optech CZMIL	Optech ALTM Aquarius
Typical Sensor Environment	Bathy	Bathy	Bathy	Topo-Bathy	Topo-Bathy
Origin	Australia	Canada	Canada	Canada	Canada
Year Released	2011	2010	2005	2011	2011
Still In Production	Yes	No	No	Yes	Yes
Laser Wavelength/s	Green 532nm	Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm
Scan Pattern Diagram (Not to Scale)					
Scan Shape	Rectilinear	Circular Arc	Circular Arc	Circular	Elliptic Arc
Scan Direction and Angle From Nadir	Fwd up to 8°	Fwd 22°	Fwd 20°	Fwd and Aft 20°	Fwd 7°
Scan Method	Oscillating Mirror	Oscillating Mirror	Oscillating Mirror	Rotating Prisms	Oscillating Mirror
Laser Energy Per Pulse (Green 532nm)	7mJ	4mJ	4mJ	3mJ	0.1mJ
Pulse Duration	6.5ns	5ns	5ns	2.0–2.2ns	7ns
Peak Measurement Frequency	1.5kHz@532	3kHz@532	1kHz@532	10kHz@532 70kHz@1064	33–70kHz@532
532nm Nominal Footprint Diameter @ Water Surface (Ve ²)	3m	2m	2m	2.4m	0.3–0.6m @ AGL Below
Nominal Flying Height	400–915m AGL	300–400m AGL	300–400m AGL	400–800m AGL	300–600m AGL
Swath Width (as a function of point spacing or altitude)	585m@8x5m 360m@5x5m 125m@2.5x2.5m	160m@2x2m 300m@3x3m	60m@2x2m 130m@3x3m	291m@400m AGL 582m@800m AGL	up to 0.93 x AGL
Typical Bathymetric Point Spacings	2x2m–8x5m	2x2m–5x5m	2x2m–5x5m	2x2m (Deep) 0.7x0.7m (Shallow)	0.4x0.4m–1x1m
Maximum Depth	~80m 2.5–3 x Secchi depth	~50m 2–2.5 x Secchi depth	~50m 2–2.5 x Secchi depth	~60m 2.5–3 x Secchi depth	~20m 1 x Secchi depth
Minimum Depth	The minimum water depth of most systems has improved substantially in recent years.				
Vertical Accuracy	All LIDAR systems have the capability to meet the required IHO accuracy standards.				

Obrázek 30. Porovnání parametrů současných batymetrických laserových skenerů č. 1 (Quadros, 2013).

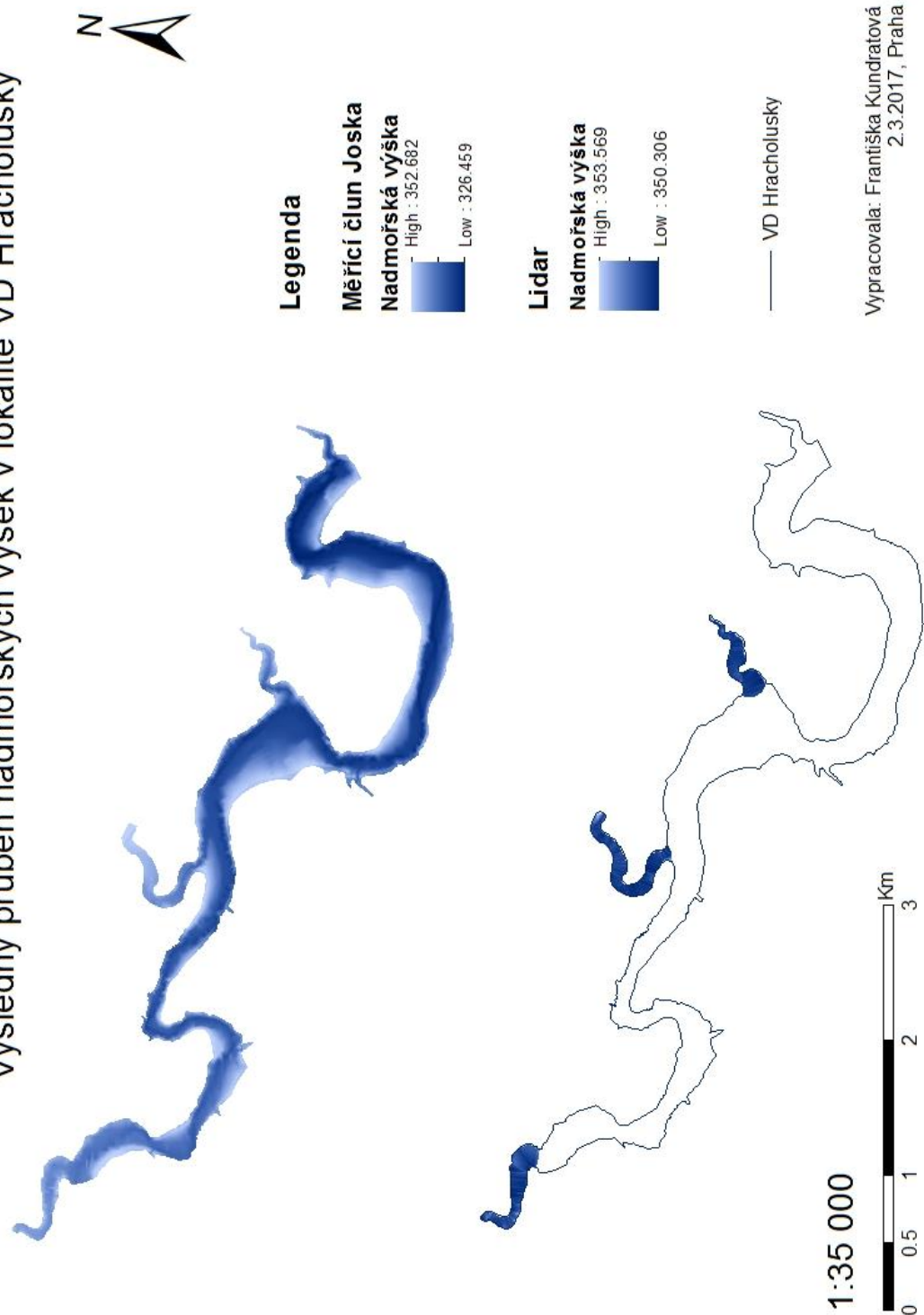
AHAB HawkEye III	AHAB HawkEye III	AHAB Chiroptera	Riegl VQ-820-G	Riegl VQ-880-G	USGS EAARL-B	NASA EAARL
Bathy	Bathy/Topo-Bathy	Topo-Bathy	Topo-Bathy	Topo-Bathy	Topo-Bathy	Topo-Bathy
Sweden	Sweden	Sweden	Austria	Austria	USA	USA
2009	2013	2012	2011	2016	2012	2001
No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm x 2 (Deep and Shallow) Infra-Red 1064nm	Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm	Green 532nm Infra-Red 1064nm	Green 532nm	Green 532nm
Elliptic Arc	Elliptical	Elliptical	Elliptic Arc	Circular	Elliptic Arc	Elliptic Arc
Fwd 20°	Fwd and Aft 14° Sideways 20°	Fwd and Aft 14° Sideways 20°	Fwd or Aft 20°	Fwd or Aft 20°	Fwd 5° Sideways 22°	Fwd 5° Sideways 22°
Oscillating Mirror	Palmer Scanner	Palmer Scanner	Rotating Multi-Facet Mirror	Rotating Prisms	Oscillating Raster Scanner	Oscillating Raster Scanner
3mJ	3mJ Deep (D) 0.1mJ Shallow (S)	0.1 mJ	0.02mJ	0.02mJ	0.4mJ 0.13mJ per beam	0.08mJ
4ns	4ns (D) 2.5ns (S)	4ns	1.2ns	1.2ns	0.85ns	1.2ns
4kHz@532 128kHz@1064	10kHz@532 (D) 35kHz@532 (S) 400kHz@1064	36kHz@532 400kHz@1064	Up to 512kHz@532	Up to 550kHz@532	15kHz or 30kHz	5kHz
6m	3m (D) 1.5m (S)	15m	0.6m @ AGL Below	0.5m @ AGL Below	0.3m per beamlet, 1.6m apart	0.2m
250–500m AGL	400–1000m AGL	250–600m AGL	Nominal 600m AGL	Nominal 600m AGL	Nominal 300m AGL	300–400m AGL
160m–260m @400m AGL 100m@250m AGL	290m@400m AGL 730m@1000m AGL	300m @400m AGL	400m	400m	230m @300m AGL	230m @300m AGL
0.5x0.5m– 3.5x3.5m	17x1.7–3.3x3.3m (D) 0.4x0.4–0.8x0.8m (S)	0.4x0.4m–1x1m	0.2x0.2m–0.8x0.8m	0.2x0.2m–0.8x0.8m	1.5 x 1.5m	2 x 3m
~50m 2–3 x Secchi depth	~50m 2–3 x Secchi depth	~20m 1 x Secchi depth	~10m 1 x Secchi depth	~10m 1.5 x Secchi depth	~27m 1.5–2.5 x Secchi depth	~27m 1.5–2.5 x Secchi depth
The minimum depth is now less than 0.2m for most sensors.						
Vertical accuracy is dependent on survey design and processing.						

Obrázek 31. Porovnání parametrů současných batymetrických laserových skenerů č. 2 (Quadros, 2013).

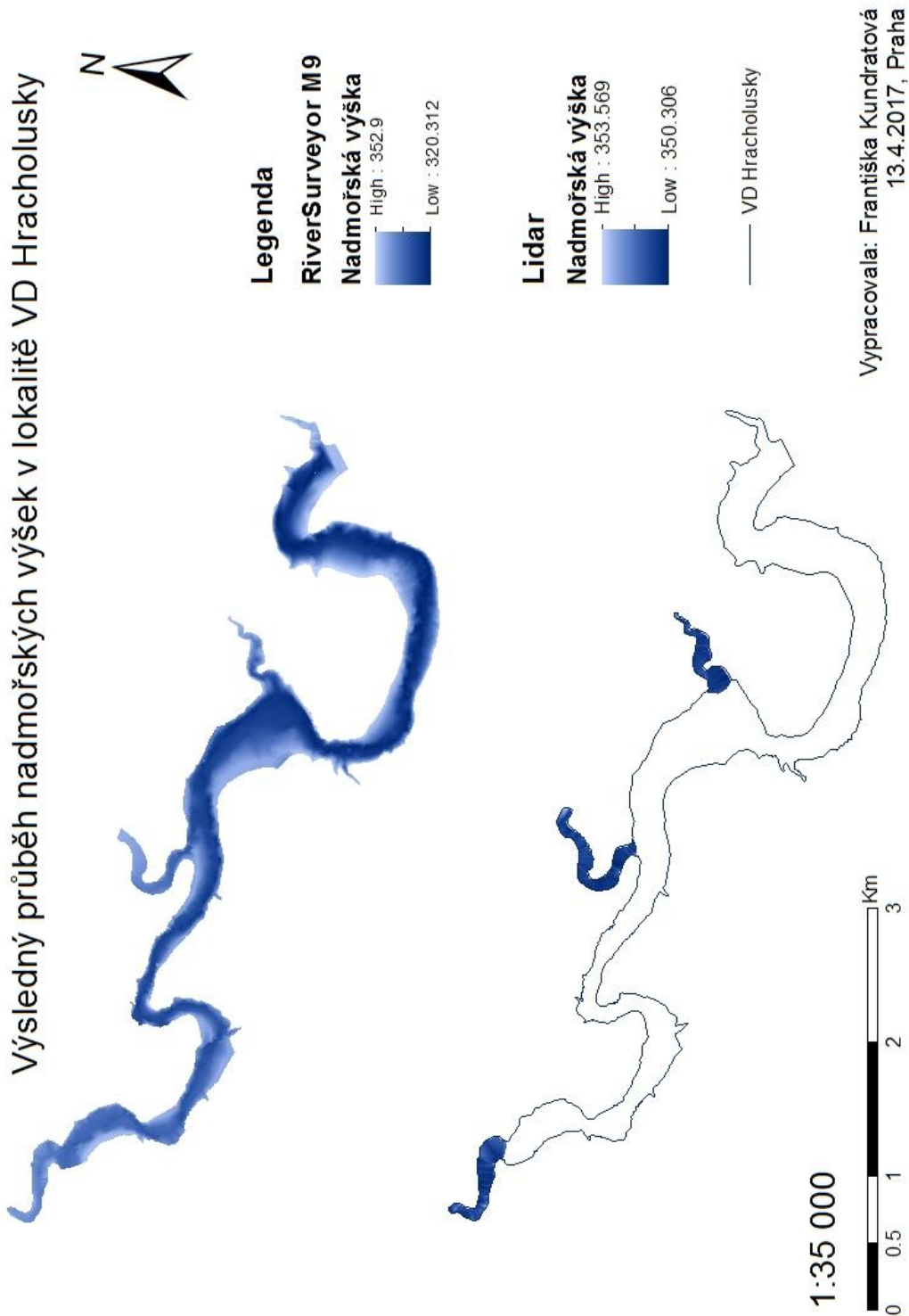


Obrázek 32. Detail zaměřené bodové vrstvy sub-lokality 1 VD Hracholusky (vlastní tvorba, 2017).

Výsledný průběh nadmořských výšek v lokalitě VD Hracholusky

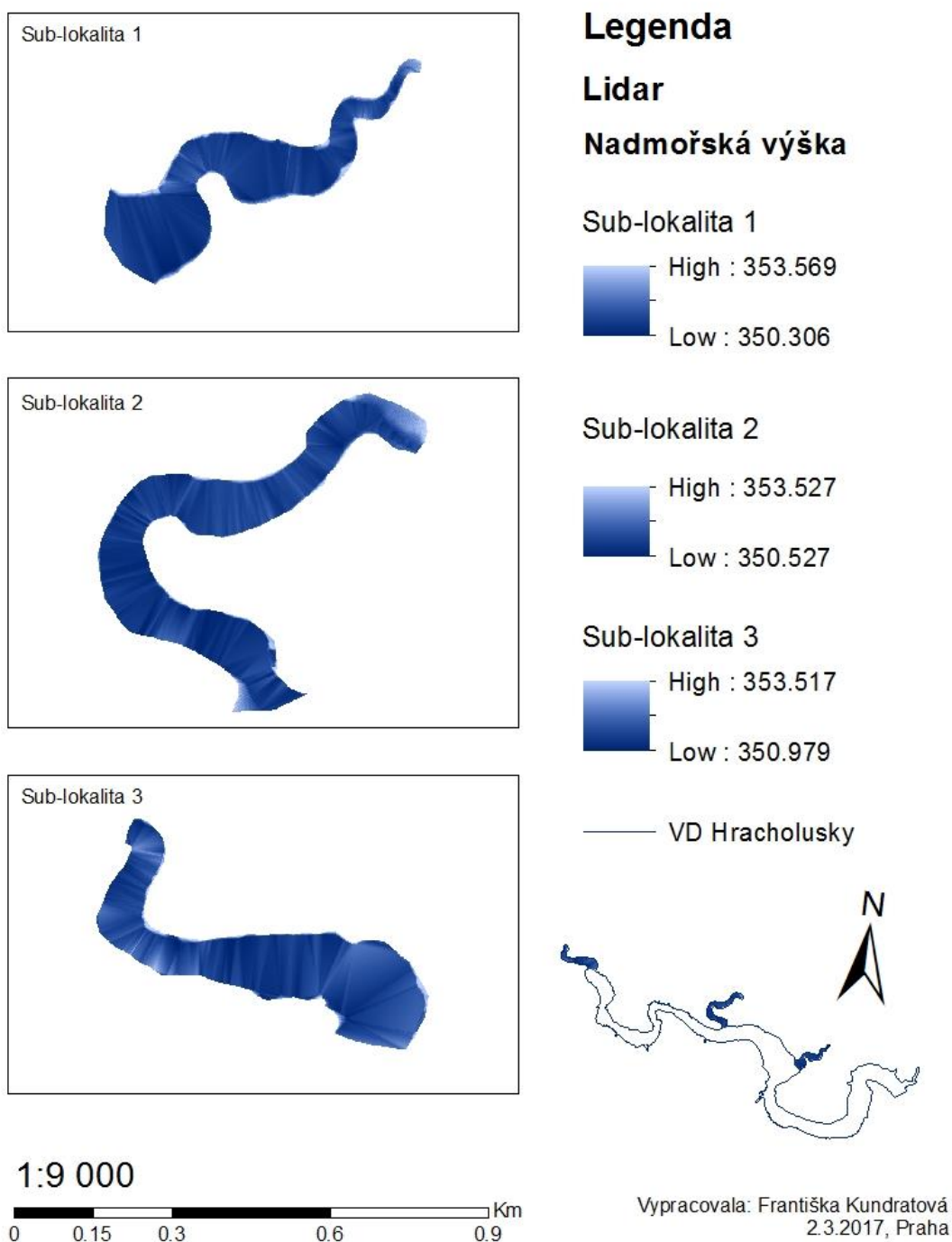


Obrázek 33. Porovnání digitálních modelů terénu zájmového území VD Hracholusky z dat zaměřených měřícím člunem Joska (nahore) a leteckým laserovým skenováním (dole) (vlastní tvorba, 2017).



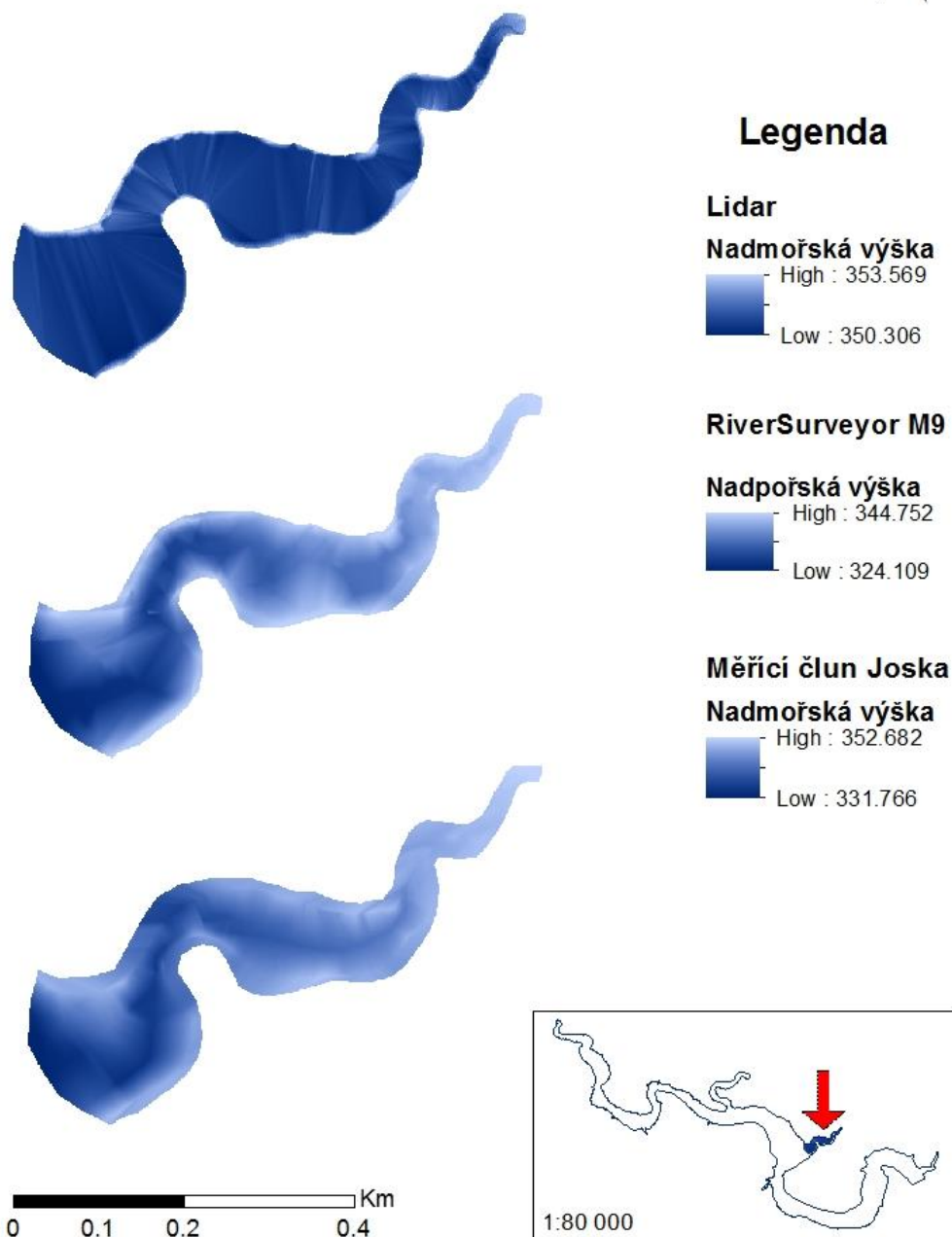
Obrázek 34. Porovnání digitálních modelů terénu zájmového území VD Hracholusky z dat zaměřených echosunderem RiverSurveyor M9 (nahore) a leteckým laserovým skenováním (dole) (vlastní tvorba, 2017).

DMT zájmové lokality VD Hracholusky vytvořený z lidarových dat



Obrázek 35. Porovnání digitálních modelů terénu dílčích sub-lokalit VD Hracholusky z dat zaměřených leteckým laserovým skenováním (vlastní tvorba, 2017).

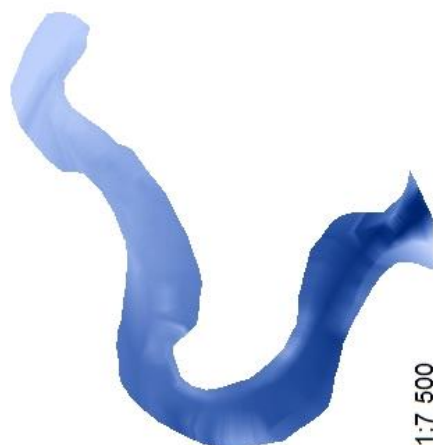
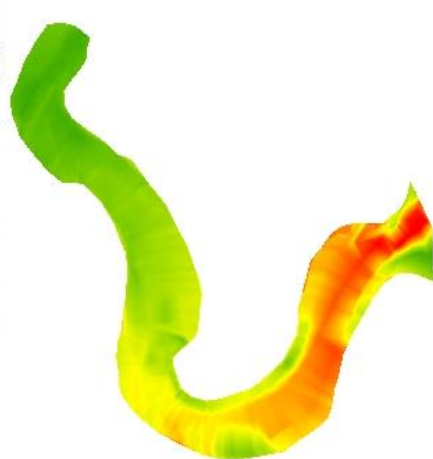
Porovnání DMT z lidarových a sonarových dat sub-lokality 1
v zájmovém území VD Hracholusky



Vypracovala: Františka Kunderatová
2.3.2017, Praha

Obrázek 36. Porovnání digitálních modelů terénu sub-lokality 1 zájmového území VD Hracholusky z dat zaměřených leteckým laserovým skenováním (nahore), echosounderem RiverSurveyor M9 (uprostřed) a měřicím člunem Joska (dole) (vlastní tvorba, 2017).

Porovnání DMT z lidarových a sonarových dat sub-lokality 2
v zájmovém území VD Hracholusky a jejich rozdíl



1:7 500



Legenda

Lidar

Nadmořská výška

High : 353.527

Low : 350.527



Měřicí člun Joska

Nadmořská výška

High : 352.104

Low : 337.705

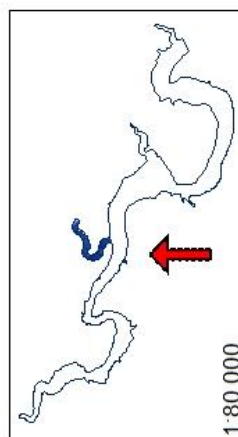


Rozdíl DMT

Odchyłka

High : 13.4918

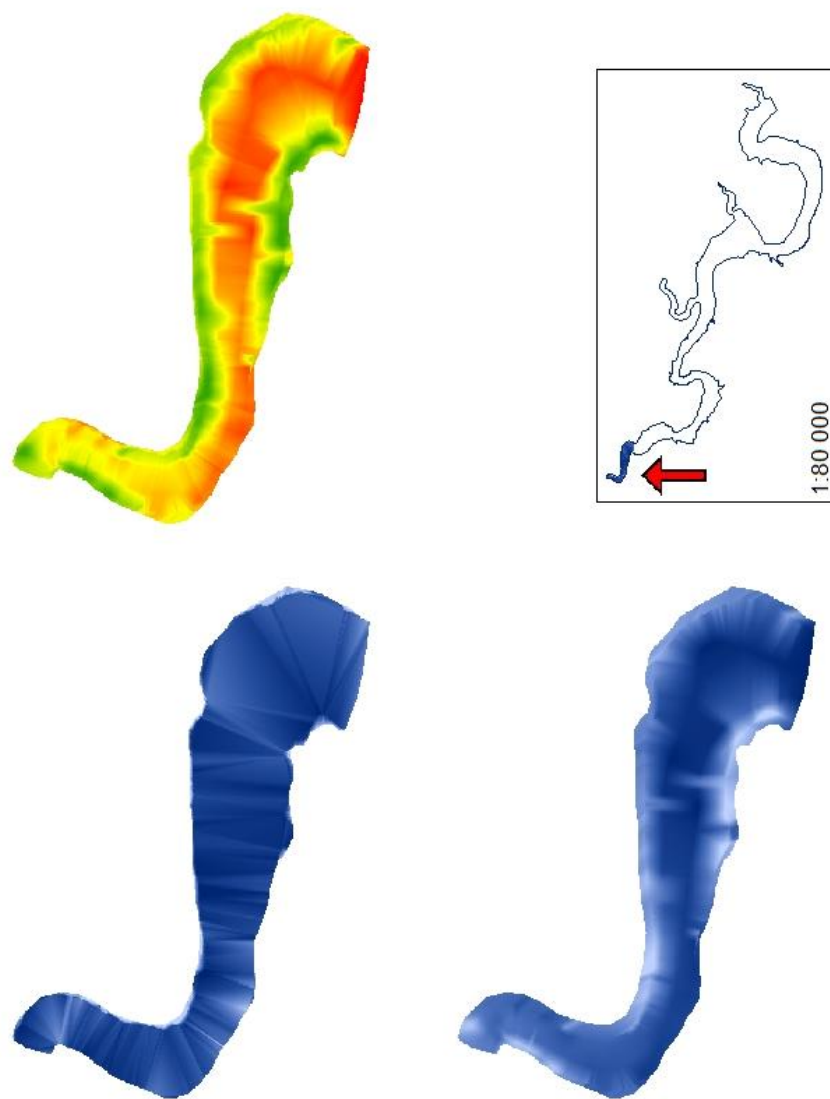
Low : -0.781464



Vypracovala: Františka Kunderatová
2.3.2017, Praha

Obrázek 37. Výsledný průběh nadmořských výšek z lidarových dat (nahore) a sonarových dat z měřicího člunu Joska (dole) a jejich rozdíl (vpravo) pro sub-lokalitu 2 zájmového území VD Hracholusky (vlastní tvorba, 2017).

Porovnání DMT z lidarových a sonarových dat sub-lokality 3
v zájmovém území VD Hracholusky a jejich rozdíl



Legenda

Lidar

Nadmořská výška

High : 353.517

Low : 350.979

Měřicí člun Joska

Nadmořské výšky

High : 351.631

Low : 342.75

Rozdíl DMT

Odchylnka

High : 9.55679

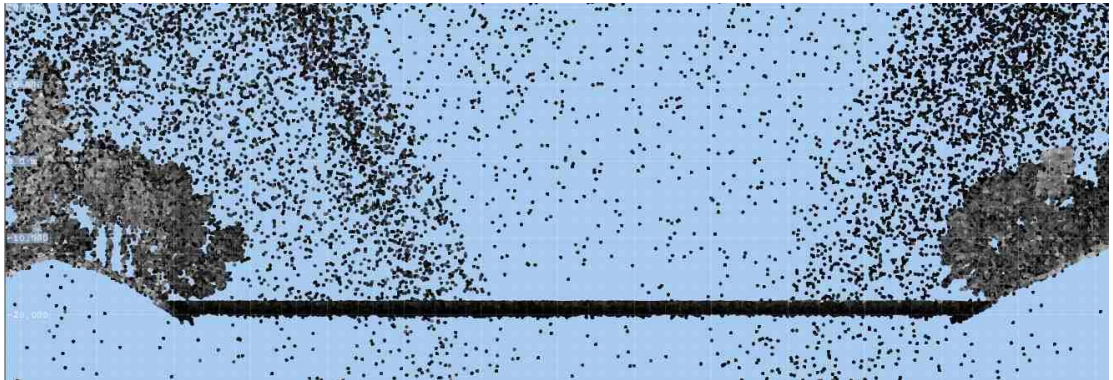
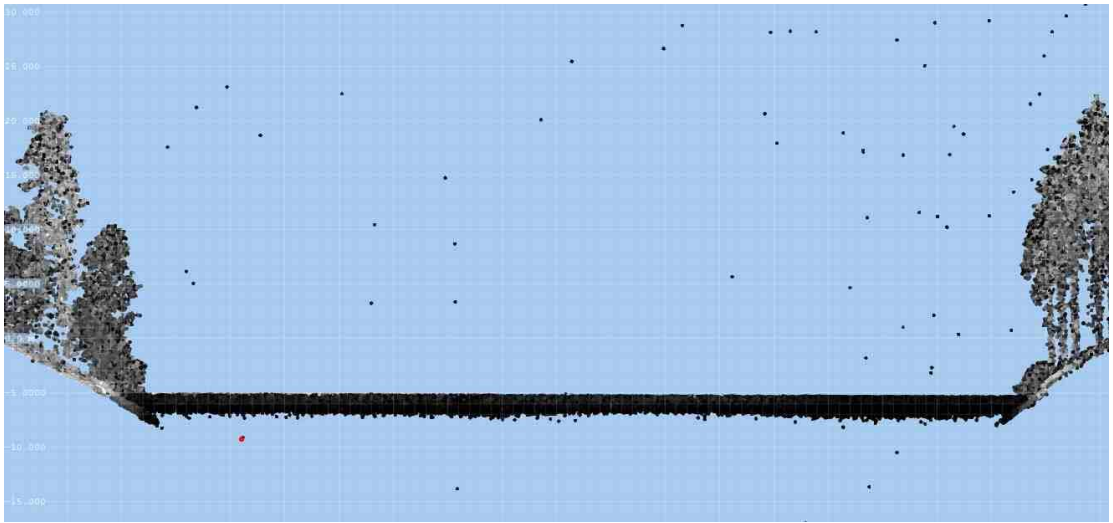
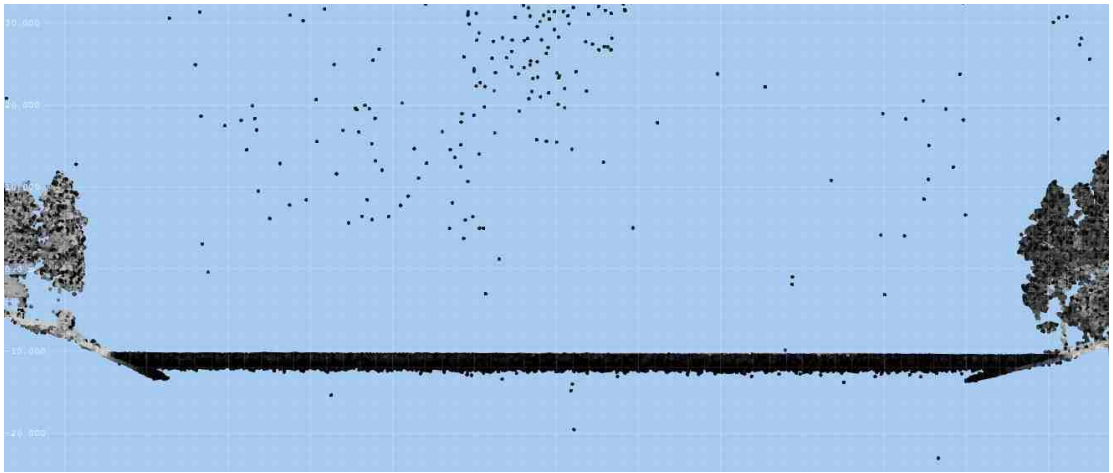
Low : -0.283325



1:80 000

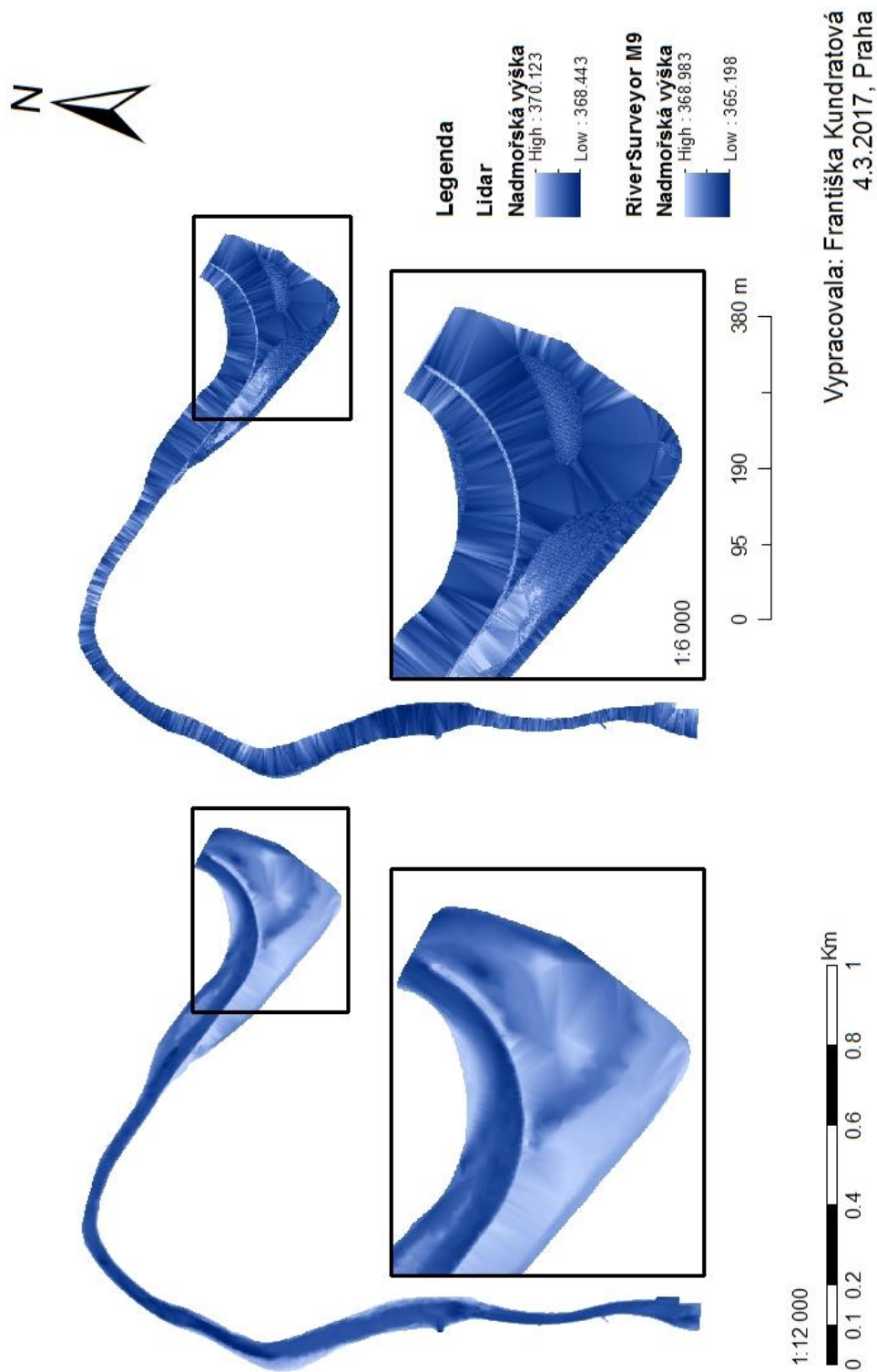
Vypracovala: Františka Kunderátová
2.3.2017, Praha

Obrázek 38. Výsledný průběh nadmořských výšek z lidarových dat (nahore) a sonarových dat z měřicího člunu Joska (dole) a jejich rozdíl (vpravo) pro sub-lokalitu 2 zájmového území VD Hracholusky (vlastní tvorba, 2017).



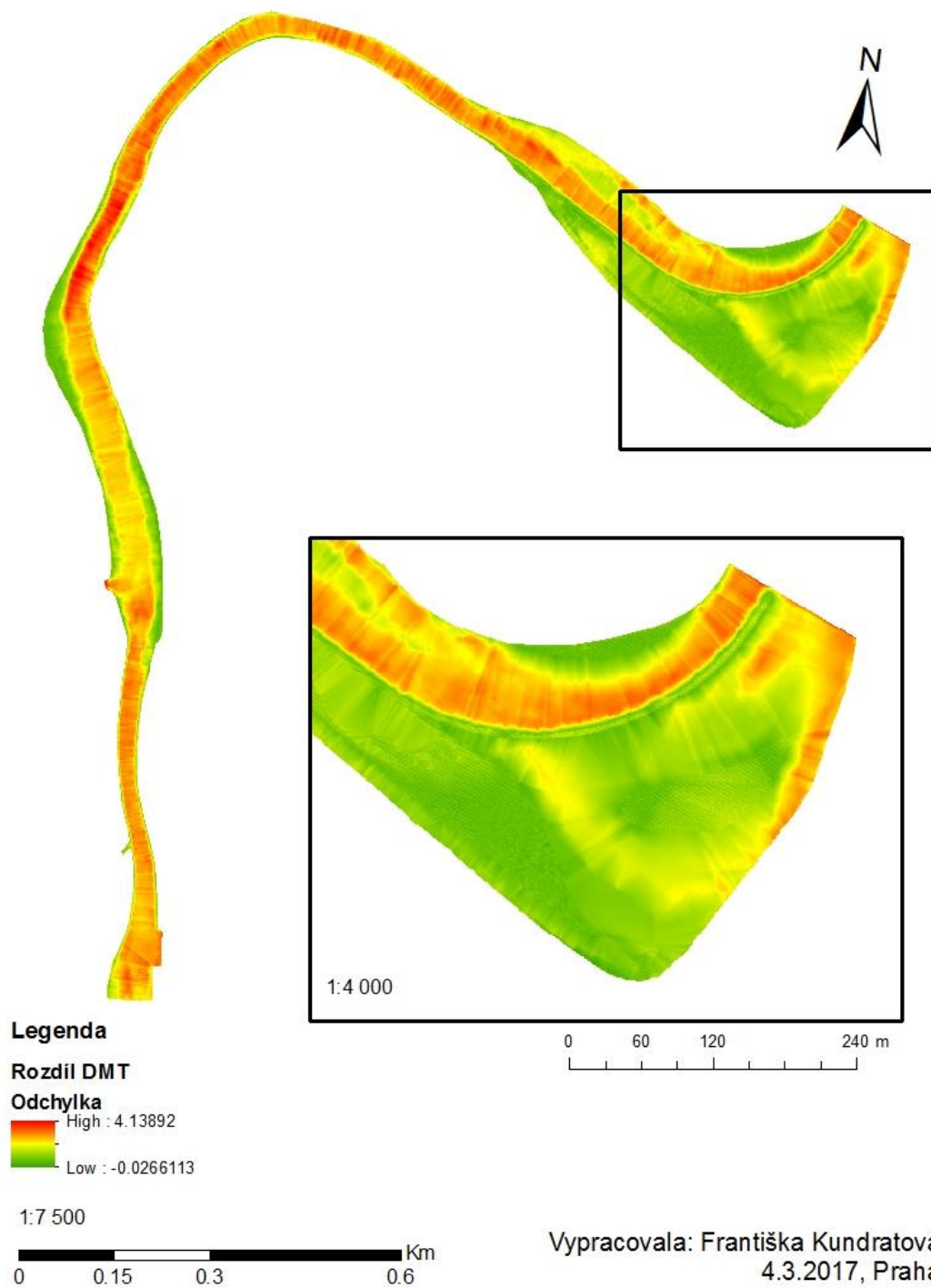
Obrázek 39. Mračna bodů zaměřená laserovým skenerem ve vybraných příčných profilech P1(nahoře) a P2 (uprostřed) a P3 (dole) ve třech sub-lokalitách VD Hracholusky (Georeal,2016).

Výsledný průběh nadmořských výšek v zájmovém úseku Vltavy

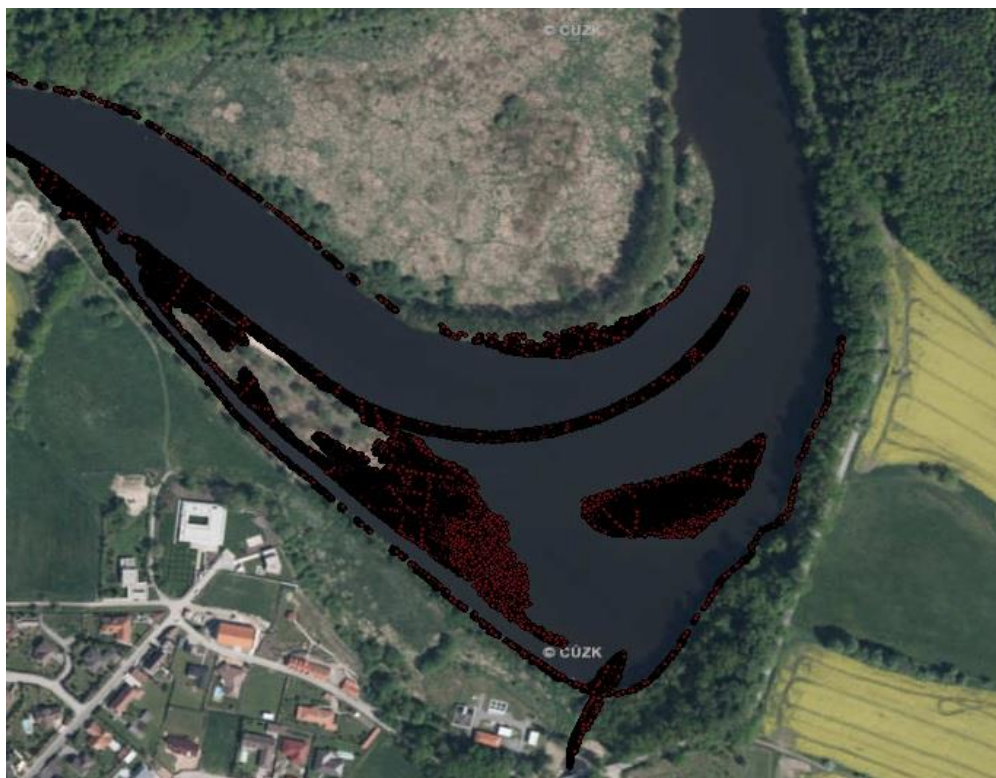


Obrázek 40. Porovnání digitálních modelů terénu úseku řeky Vltavy z dat zaměřených echosunderem RiverSurveyor M9 (vlevo) a leteckým laserovým skenováním (vpravo)(vlastní tvorba, 2017).

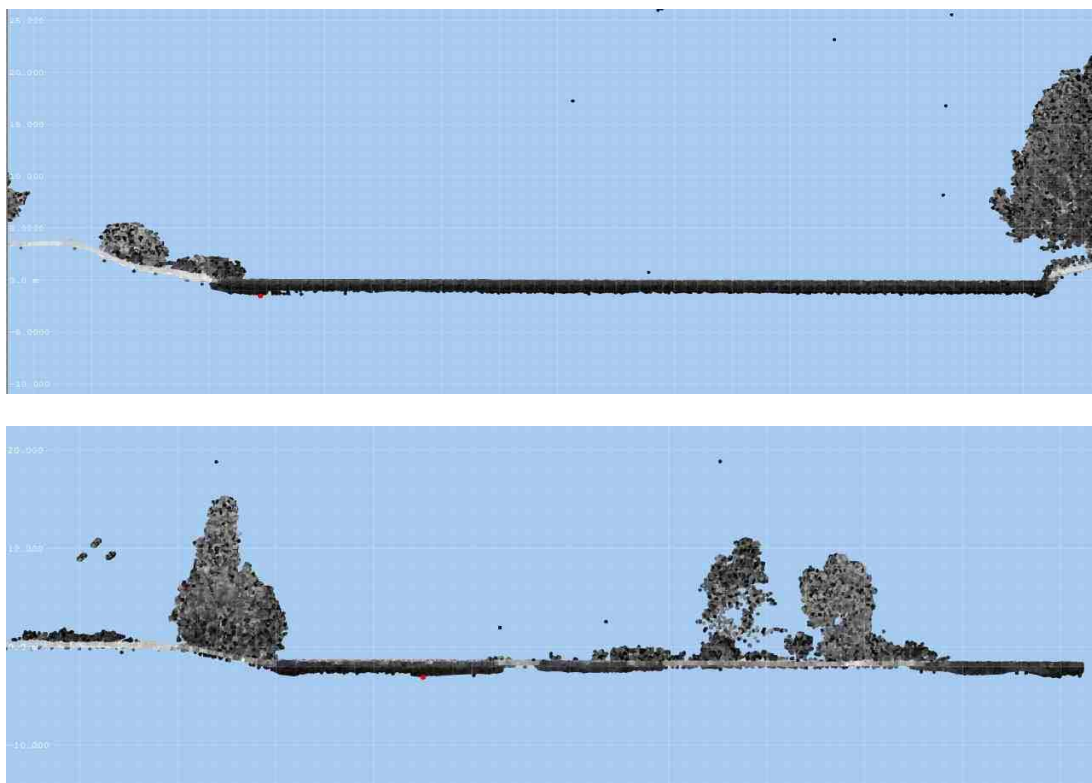
Rozdíl DMT zájmového úseku Vltavy



Obrázek 41. Rozdíl digitálních modelů terénu z lidarových dat a sonarových dat z echosoundery RiverSurveyor M9 zájmového úseku řeky Vltavy (vlastní tvorba, 2017).



Obrázek 42. Detail pravého meandru na konci vybraného úseku Vltava se zobrazeným mračnem bodů z LLS (vlastní tvorba, 2017).



Obrázek 43. Mračna bodů zaměřené laserovým skenerem ve vybraných příčných profilech P1(nahoře) a P2 (dole) v zájmovém úseku řeky Vltavy (Georeal,2016).