

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Bc. Tomáš Stanovský

Diplomová práce

**3D rekonstrukce zaniklých plavebních nádrží pomocí UAV
fotogrammetrie**

3D reconstruction of abandoned ponds using UAV photogrammetry

Vedoucí práce: prof. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Praha, 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 08. 04. 2019

Bc. Tomáš Stanovský

podpis studenta

Poděkování:

Poděkování patří především mému školiteli, prof. Jakubu Langhammerovi, jenž mi poskytl data, rady ohledně přístupů a pohotovou odezvu během zpracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi, Mgr. Marku Smazovi, za zpětnou vazbu k práci. Nakonec chci poděkovat mé rodině i přítelkyni za vzdálenou podporu a mé přítelkyni za to, že se mnou setrvává i přes velkou vzdálenost během období, kdy jsem svůj čas věnoval sepsání této diplomové práce.

Abstrakt

Hlavním zaměřením diplomové práce je rekonstrukce 3D modelů a digitálních elevačních modelů pěti zaniklých plavebních nádrží v povodí Roklanského potoka užitím metody UAV fotogrammetrie. Cílem práce je porovnat přesnost vytvořených modelů vůči konvenčním datovým zdrojům a historickým údajům. Souběžným tématem je jednak výzkum přesnosti modelů vytvořených skrze UAV metody a jednak výzkum uplatnění retenčního potenciálu malých vodních nádrží, mimo jiné v horských pramenných oblastech. Pro postup práce byly použity série snímků nádrží pořízených fotoaparátem připevněného k dronu. Tvorba modelů proběhla zpracováním snímků ve fotogrammetrickém softwaru Agisoft PhotoScan skrze proces workflow, klasifikaci hustého bodového mračka a následnou interpolací klasifikovaných bodů do podoby DEM. Vymezení maximálního zádržného prostoru nádrží, výškopisné korekce a batymetrické analýzy byly uskutečněny v programu ArcMap nad interpolovaným DEM. Výsledky a diskuze poukazují na přínosy i omezení UAV metod, zejména vzhledem k výškopisné přesnosti výsledných modelů vůči konvenčním datům z DMR5G a batymetrických charakteristik vyvozených z modelů.

Klíčová slova: UAV; DEM; retence; GIS; model; nádrž

Abstract

The main focus of the thesis is the reconstruction of 3D models and digital elevation models of five abandoned splash dams in Roklanský brook catchment using UAV photogrammetry methods. The aim of this work is to compare accuracy of the models with available conventional data sources and historical sources. Parallel topic is the research of accuracy of the models created through UAV methods and application of retention potential of small water reservoirs, in headwater areas. The images were taken with a drone-mounted camera. Modelling was done by processing images in software Agisoft PhotoScan through a workflow process, dense point cloud classification and subsequent DEM interpolation. Subsequent delineation of reservoirs retention space, altimetry correction and bathymetric analysis was performed in ArcMap over the interpolated DEM. The results and discussion point to the benefits and limitations of UAV methods, especially to altimetric accuracy of the resulting models relative to conventional DMR5G data and bathymetric characteristics derived from the models.

Keywords: UAV; DEM; retention; GIS; model; pond

Obsah práce

I. ÚVODNÍ ČÁST	4
1. Úvod	4
1.1 Význam vody v krajině	4
1.2 Faktory změny klimatu.....	6
1.3 Vodohospodářství a ochrana přírodní krajiny	9
1.4 Cíle a rámec práce.....	10
2. Fyzicko-geografická charakteristika území.....	12
2.1 Geografické a hydrografické vymezení	12
2.2 Geologie	14
2.3 Geomorfologie.....	14
2.4 Půdní prostředí.....	15
2.5 Přírodní poměry.....	16
2.6 Ochrana území	17
2.7 Klimatické a meteorologické poměry	19
2.8 Hydrologické poměry.....	20
2.9 Extrémní události	22
2.9.1 Povodně	22
2.9.2 Kůrovcová kalamita	23
II. REŠERŠNÍ ČÁST	25
3. Návaznost na předešlé hydrologické práce ve studované oblasti	25
4. Vodní nádrže.....	26
4.1 Definice a rozdělení	26
4.2 Hrazení nádrží.....	32
4.3 Rizika spojená s retencí vody	33
4.4 Výzkum využití malých vodních nádrží v protipovodňové ochraně	37
5. UAV technologie	41
5.1 Definice	41
5.2 Přínosy	42
5.3 Legislativní a technická omezení.....	42
5.4 Příklady užití v hydrologických studiích	43
5.5 Hodnocení přesnosti modelů vytvořených skrze metody UAV	45

III. METODICKÁ ČÁST	51
6. Popis užitých dat.....	51
6.1 UAV letecké snímky	51
6.2 Konvenční výškopisná data	52
7. Metodika.....	52
7.1 Tvorba 3D texturovaného modelu povrchu nádrží.....	52
7.2 Klasifikace bodového mračna a tvorba DEM	56
7.3 Vymezení hranice zádržného prostoru	60
7.4 Filtrování nesprávně klasifikovaných bodů	60
7.5 Výškopisná korekce modelu.....	63
7.6 Odvození parametrů plavebních nádrží	68
8. Výsledky	70
8.1 Trojdimenzionální modelování nádrží.....	70
8.2 Batymetrická analýza a parametry hrází	75
IV. DISKUZNÍ A ZÁVĚREČNÁ ČÁST	81
9. Diskuze.....	81
9.1 Otázky přesnosti modelů vytvořených skrze metody UAV	81
9.2 Otázky uplatnění zaniklých plavebních nádrží v protipovodňové ochraně	83
10. Závěr.....	86
Seznam literatury a zdrojů.....	89
Seznam obrázků, tabulek a grafů	98
Použité zkratky.....	98
Přílohy.....	100
Příloha 1.....	100
Příloha 2.....	105
Příloha 3.....	107

I. ÚVODNÍ ČÁST

1. Úvod

1.1 Význam vody v krajině

Člověk od nepaměti přizpůsoboval přírodní krajinu pro funkční účely jemu vyhovujícím. Ve sféře vodního hospodářství se tyto praktiky odrážely například v budování drobných úprav toků, jakými jsou například jezy, náhony pro mlýny, až po budování rozsáhlých vodních děl v podobě přehrad, kanalizačních systémů či v napřimování toků. Díky těmto zásahům měla společnost přístup k levným zdrojům energie, možnostem upravit kvalitu vody pro pitné potřeby, zavlažování, rekreaci a dalším z mnoha funkcí, které hydrologický systém poskytoval díky opakujícímu se hydrologickému cyklu ve vhodných klimatických a geologických podmínkách. Celkem 71% zemského povrchu je pokryto vodou, z čehož drtivá většina objemu vody na Zemi je uložena ve světovém oceánu (96,5%), přístup k vodním zdrojům je přesto omezený ať už to z důvodu přístupu ke globálním zásobám pitné vody nebo celkově k přístupu k jakýmkoliv zásobám vody a následným umocněním celé problematiky vlivem sucha. Do kontrastu k nedostatku vody jde její nadbytek, jenž může být důležitou složkou ve výskytu extrémních hydrometeorologických událostí v podobě bouří a povodní.

Starověké civilizace si byly vědomy cennosti vodních zdrojů a snažily se proto vodu zachytávat do vybudovaných zádržných prostor o různém objemu. Názorným příkladem v pozoruhodných výsledcích v budování vodohospodářských struktur dosahovala od 9. století Khmérská říše s centrem v tehdejší město Angkor Vat, v němž byla vybudována komplexní zavlažovací síť propojená s velkými nádržemi zvanými *baray* (Kummu, 2008). Celý systém o rozsahu 1 000 km² byl jedním z hlavních důvodů prosperity města i celé říše. Největší rezervoár poblíž hlavního chrámu o rozloze 17 km² včetně dalších malých vodních nádrží shromažďovaly vodu z letních monzunů, čímž se spolu s opatrnými vodohospodářskými praktikami zásobovala voda během suchých zimních měsíců. Jednou z teorií úpadku Angkoru Vat během jediného století je dáván za vinu právě tomuto sofistikovanému, leč křehkému vodnímu systému, který mohl přispět k rozpadu celého města. Ve 13. století nastal nástup neobvyklých epizod sucha střídajících se s extrémními povodněmi z monzunových dešťů. V kombinaci s dlouhodobým odlesňováním a sníženým zájmem v udržování vodního systému došlo

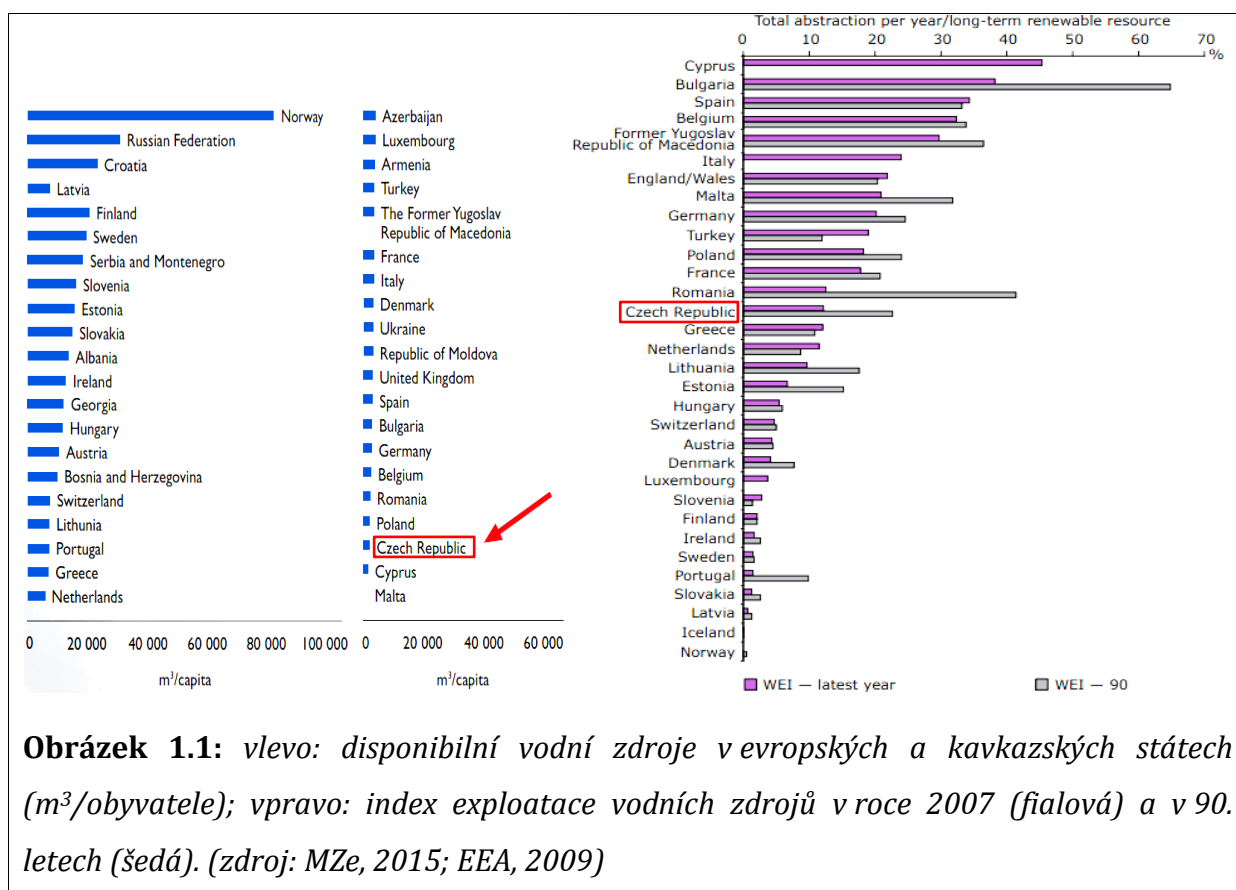
k celkovému kolapsu infrastruktury ve městě (Stone, 2009). Na tomto příkladu lze pozorovat efektivnost, ale i citlivost systému nádrží, které především závisí na vztahu společnosti k porozumění jejich funkce a následnému přizpůsobení těchto vědomostí k jejich provozu.

Přibližně ve stejném období se na našem území během 8. až 9. století začaly budovat tzv. *stavy*, jež představovaly odvodněné močály za účelem chovu ryb. Druhá etapa rozvoje rybníků nastala během 2. poloviny 14. století, kdy byly močály a blata plošně zatápěny. Třetí rozvojová etapa rybníků představovala systematickou tvorbu rybníčních soustav od počátku 16. století, stále ještě spíše za hospodářským účelem chovu a lovu ryb. První údolní nádrž určená k zachycování povodní byla vybudována až ve 2. polovině 16. století – Staňkovský rybník o rozloze 241 ha a objemu 6,6 mil. m³. Výstavbu rybníků a malých vodních nádrží na našem území obecně narušovaly husitské války, třicetiletá válka a hospodářský přístup k nádržím v podobě vysušování, zavážení a přeměny na jiný typ krajiny. Kromě rekonstrukce největších českých rybníků na přelomu 19. a 20. století však výstavba malých vodních nádrží stagnovala (Leipetlová, 2010).

Ve středoevropských mírných klimatických podmínkách jsou směrodatné zásoby vody v podobě podzemní vody, atmosférické vody, řek a vodstva přírodních či umělých rezervoárů. Povrchová sladkovodní voda na celé planetě představuje objem o celkové velikosti kolem 10 634 000 km³. Z tohoto celkového objemu připadá 93 113 km³ sladkovodním zásobám v jezerech a řekách, z čehož pouze říční systém disponuje objemem 2 120 km³, zbytek připadá sladkovodním jezerům (USGS, 2016). Sladkovodní zásoby řek a jezer dohromady tvoří 0,26% celosvětových zásob sladké vody. Spolu s atmosférickou vodou (0,001% zásob) a podpovrchovou vodou (30,1% zásob) vytváří tyto zásobníky hlavní zdroje pitné vody na našem území vyjma největšího zásobníku pitné vody – ledovců (68,1% zásob), které se na území ČR nenachází.

Vodní zdroje v ČR jsou zcela závislé na atmosférických srážkách a díky poloze státu v pramenné oblasti evropských řek, kde téměř všechna voda odtéká do sousedních států, je stav vodních zdrojů více ovlivněn hydrologickými extrémami, než je tomu v případě většiny ostatních evropských států (MZe, 2015). Toto napětí vytváří potřebu určitým způsobem dlouhodobě regulovat i zachycovat vodu pro hospodářské účely. Na našem území existuje pro tyto účely celkem 165 významných vodních nádrží a přibližně 25 000 malých vodních nádrží (MZe, 2017). Tento systém nádrží v kombinaci

s podzemními zásobami vody zachytává vodní zdroje, které však v porovnání s ostatními evropskými státy disponují velmi malým objemem na obyvatele (obrázek 1.1). Do tohoto problému vstupuje i vodohospodářský faktor spotřeby vodních zdrojů, který je udán tzv. indexem WEI (*index exploatace vodních zdrojů*). Index porovnává objem dostupných vodních zdrojů vůči spotřebované vodě za určité období v daném regionu, přičemž index s hodnotou větší než 20% indikuje nedostatek vody. Hodnota WEI pro ČR se v roce 2007 pohybovala okolo 12% a v porovnání s hodnotou pro 90. léta jde o téměř poloviční pokles (obrázek 1.1; EEA, 2009). Dostatečně velké zásobovací nádrže se schopností adekvátní regulace extrémních hydrologických jevů za účelem prevence před povodňovými riziky pro jednotlivě vymezené regiony se z vodohospodářského hlediska v ČR může jevit jako zásadní v otázkách zlepšení vodních zdrojů a zvýšení retence vody v krajině (MZe, 2015).



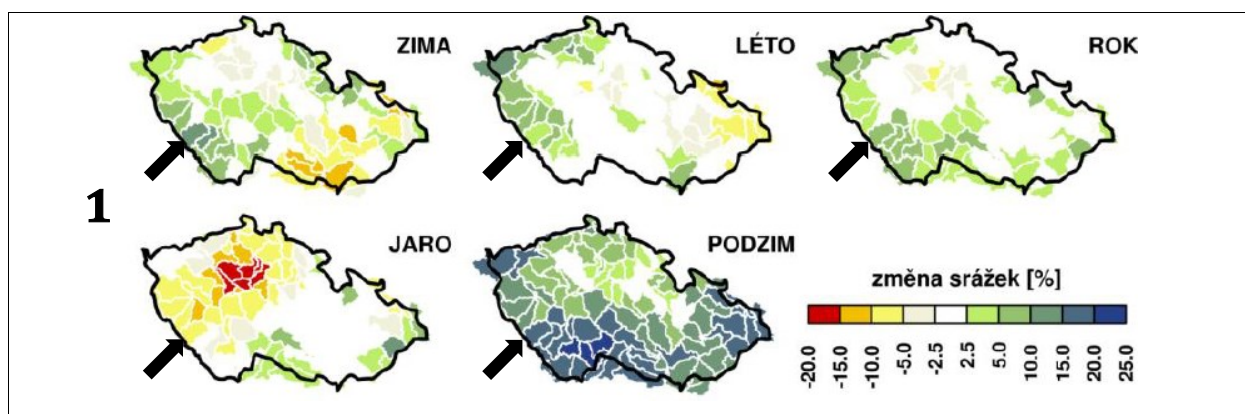
Obrázek 1.1: vlevo: dostupibilní vodní zdroje v evropských a kavkazských státech (m^3 /obyvatele); vpravo: index exploatace vodních zdrojů v roce 2007 (fialová) a v 90. letech (šedá). (zdroj: MZe, 2015; EEA, 2009)

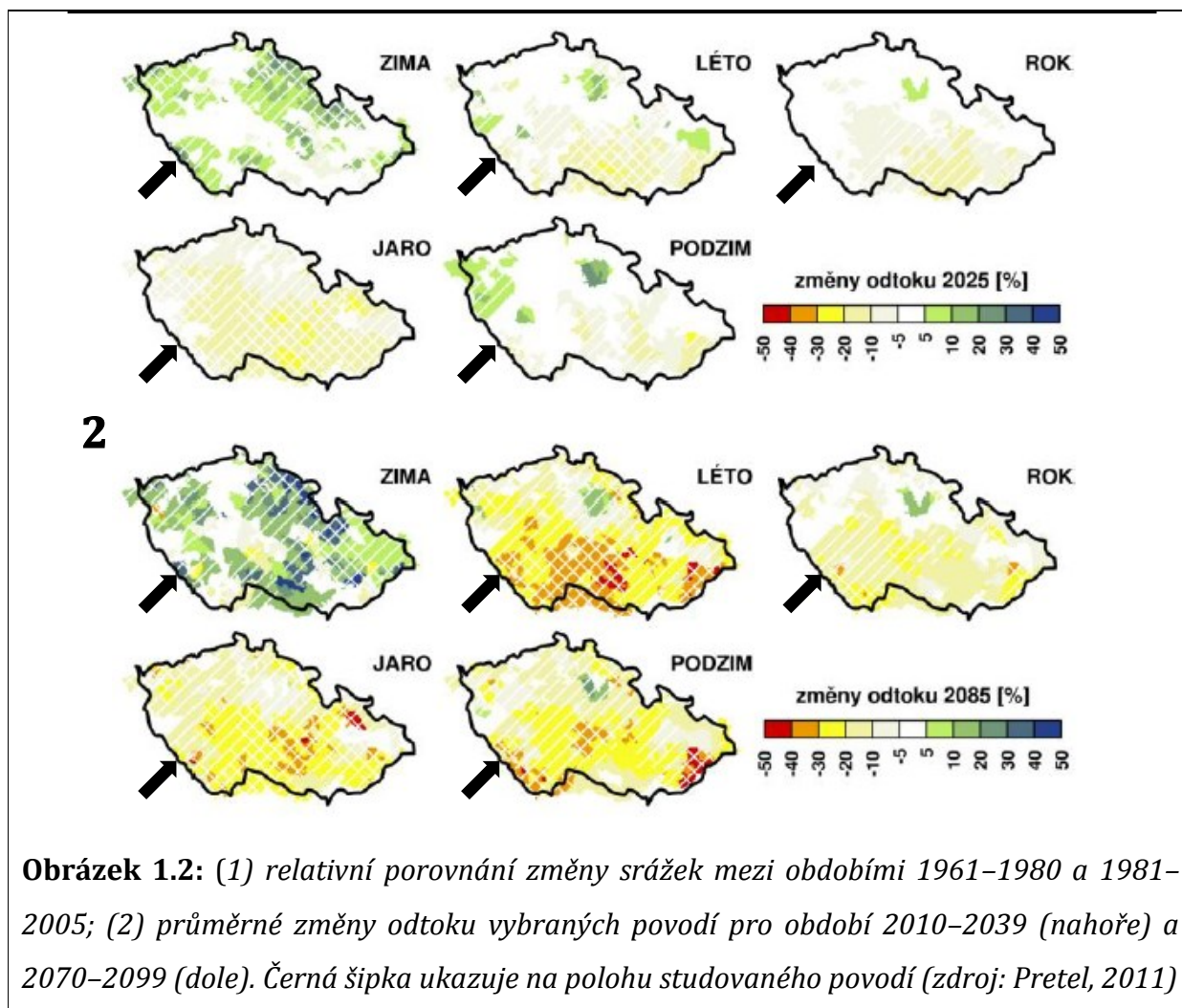
1.2 Faktory změny klimatu

Navzdory částečné skepsi ze strany laické veřejnosti vůči klimatickým změnám dochází k pozvolnému oteplování naší planety. Názorným je objasnění hlavních otázek týkajících se klimatické změny na webu www.skepticalscience.com, kde jsou shromážděny klíčové

odpovědi podepírající teorii a které jsou převzaty z mnoha výzkumů na toto téma. Od roku 1950 probíhají změny klimatu odlišně od minulých dekád. Každá následující dekáda od roku 1850 byla teplejší, než ta předcházející, z čehož interval mezi lety 1983 až 2012 představoval nejteplejší třicetileté období za posledních 1 400 let (IPCC, 2015). Dominantní příčiny změny klimatu jsou přisuzovány zvýšené koncentraci oxidu uhličitého, metanu a oxidům dusíku, souhrnně označovaných jako skleníkové plyny. Člověkem kontrolované skleníkové plyny jsou důsledkem kombinací růstu populace a ekonomického růstu. Obsah těchto plyných sloučenin je přitom nejvyšší za posledních 800 000 let (IPCC, 2015). Celosvětově došlo vlivem skleníkových plynů k růstu teploty v průměru o 0,82°C během let 1880 až 2012 (IPCC, 2015). Extrapolace těchto trendů do roku 2050 předpovídá v nejhorším případě nárůst povrchové teploty až o 2°C. Růst teploty podporuje potenciální evapotranspiraci a přímo tedy srážkové události. V mírném klimatickém pásu severní polokoule je navíc zaznamenán celkový nárůst srážek od roku 1951. Extrémní hydrometeorologické události v mírném podnebném páse pak budou, s velkou pravděpodobností, více frekventovanější i intenzivnější (IPCC, 2015).

Klimatické změny probíhají i na území České republiky. Výsledky změn pozorovaných mezi lety 1981–2005 poukazují na nárůst průměrné roční teploty o zhruba 0,6 až 1,2°C; s tím souvisejícím nárůstem průměrné roční potenciální evapotranspirace o cca 5 až 10% a až 10% příbytkem průměrných ročních srážek (Pretel, 2011).





Obrázek 1.2: (1) relativní porovnání změny srážek mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005; (2) průměrné změny odtoku vybraných povodí pro období 2010–2039 (nahore) a 2070–2099 (dole). Černá šipka ukazuje na polohu studovaného povodí (zdroj: Pretel, 2011)

Klimatické změny hrají důležitou roli i ve studovaném povodí Roklanského potoka, nacházejícího se v jihozápadních Čechách na hranici s Německem (viz černá šipka, obrázek 1.2). Vodní toky zde tvoří síť v rámci pramenné oblasti řeky Vydry, potožmo Otavy, jež je levostranným přítokem řeky Vltavy. Z výše zobrazených kartogramů pro povodí Roklanského potoka vyplývá především nárůst průměrných ročních srážek mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005 v zimních (10–15%) a podzimních (15–20%) měsících, naopak jarní měsíce vykazovaly podprůměrný výskyt srážek (pokles o 5–10%). Pro tuto oblast je taky predikován zvýšený odtok z povodí v zimních měsících (20–30% pro rok 2025, 30–40% pro rok 2085). Naopak snížení odtoku lze očekávat pro ostatní měsíce v dlouhodobém horizontu přibližně sedmdesáti let (průměrně 10–20% úbytku odtoku; Pretel, 2011). Predikovaná rozkolísanost příbytku i úbytku výšky odtoku v příslušných měsících podtrhuje fakt, že pramenné oblasti v jihozápadních Čechách v pohoří Šumavy budou svým způsobem klíčové pro kontrolu odtoku propojeného říčního systému níže podél toku.

Mimo důležitost vodohospodářské funkce říčního systému jsou veškeré vodní plochy a řečiště v pramenné oblasti Šumavy také důležité pro jiný, neméně důležitý systém, kterým je ekosystém.

1.3 Vodohospodářství a ochrana přírodní krajiny

V České republice existuje tradice ochrany přírody a krajiny přibližně od konce 14. století, kdy hlavním předmětem ochrany byly lesy a zvěř ohrožená pytláctvím. První konkrétní území spadající do předmětu ochrany byly vyhlášovány napříč 19. a 20. stoletím. V dnešní době existuje mnoho právních dokumentů a nástrojů, které blíže definují objekty a podmínky pro ochranu přírody a krajiny. Hlavní legislativní dokument představuje zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, v němž jsou definovány dva důležité pojmy: *krajina* a *ekosystém*. Definicí krajiny je „*část zemského povrchu s charakteristickým reliéfem, tvořená souborem funkčně propojených ekosystémů a civilizačními prvky.*“; ekosystém je pak definován jako „*funkční soustava živých a neživých složek životního prostředí, jež jsou navzájem spojeny výměnou látek, tokem energie a předáváním informací a které se vzájemně ovlivňují a vyvíjejí v určitém prostoru a čase*“ (§ 3 zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny). Z definice ekosystému i krajiny vyplývají klíčová slova „*propojený*“ v případě definice krajiny a „*spojeny*“ v případě definice ekosystému, jež indikují úzkou vazbu mezi biotickou a abiotickou složkou přírody spolu s civilizačními prvky. Jsou to hlavně civilizační prvky, které zasahují do krajiny přímo nebo nepřímo skrze změnu abiotických faktorů v ekosystému a narušují či stabilizují vazby mezi živými i neživými složkami.

Šumavský národní park a chráněnou krajinnou oblast postihly v posledních letech katastrofy spojené s kůrovcovou kalamitou či kyselými dešti. Souběžně s těmito událostmi se v šumavské oblasti rozvíjel aplikovaný výzkum, který na sebe postupně začal nabírat pozornost dalších akademiků, vědců, politiků i veřejnosti. Tato pozornost vyžaduje obezřetnější přístup jak správců, tak ochránců přírody vzhledem k celé sérii postupného zasahování na území parku, jež doposud vyvolalo celou řadu konfliktů.

Jiná problematika – problematika přirozených povodní a sucha, tak nemusí být nutně problémem pro člověkem nedotčené ekosystémy, má však přímý vliv na obyvatele, stát a jejich majetek. Výzkumné projekty v Česku i zahraničí se proto zaměřují na zmírnění dopadů těchto přírodních ohrožení, mimo jiné způsobem zadržování vody v krajině.

K tomu by měly posloužit uměle vytvořené klauzy v horních tocích povodí Vydry, jež pramení a protéká národním parkem Šumava. Snaha o zapojení těchto umělých nádrží do projevu náhlých a extrémních hydrometeorologických změn podněcuje výzkumné týmy, aby zjistily míru uplatnitelnosti klauz během epizod povodní i sucha. Z historických hrubých měření objemů celkem osmi nádrží v povodí Vydry vyplývá, že dohromady dokáží zadržet objem vody o objemu přibližně 90 tisíc m³ (Sumavanet, cit. 2019). Pět z těchto klauz je ústředním předmětem výzkumu této diplomové práce.

Na území NP Šumavy se navíc vyskytuje nespočet vrchovišť mající vysokou hodnotu, jež spočívá v jejich funkcích, kde mezi ty nejdůležitější patří funkce ekosystémové (ukládání organické hmoty, dodávka živin do cyklu potravního řetězce, čištění vody, vztah vrchoviště a podzemní vody) a socio-ekonomické (kontrola povodní, rekreace, výzkum). Multifunkční využití rašelinišť a mokřadů, při kterém se střetávají odlišné nároky na využívání území od ochrany přírody, přes povodňovou ochranu, vodohospodářský management až po turistický ruch a socioekonomický rozvoj. Nicméně mimo přirozené příčiny úbytku mokřadů a rašelinišť jsou hlavní příčinou jejich úbytku přímé i nepřímé lidské zásahy. Rekultivace poškozených mokřadů byla vždy drahou inženýrskou činností, která navýšila jejich ekonomickou hodnotu, v důsledku čehož převážila náklady na odvodnění nebo zmírnění povodní (Pacione, 1999). Na Šumavské rašeliniště se od roku 1990 vztahuje mezinárodní Ramsarská úmluva (1971), která vyžaduje jednak zachování jejich ekologického charakteru, a jednak organizované plánování pro jejich rozumné užívání (AOPK ČR, cit. 2019). Tato opatření a fakta pochopitelně do značné míry omezují zásahy do zdejší krajiny za účelem zvýšení jejího retenčního potenciálu v protipovodňové ochraně i během suchých období.

1.4 Cíle a rámec práce

Tato diplomová práce navazuje na výzkum retenčního potenciálu malých vodních nádrží, mimo jiné v hydrometeorologických, geologických a ekologických podmínkách pramenných oblastí Šumavy (Janský, Kocum, 2007; Ševčíková, 2009; Leipetlová, 2010; Šmrhová, 2014; Miřijovský, Langhammer, 2015; Vacková, 2016; Langhammer et al., 2018).

Cílem práce je:

- 1)** Provést přesnou 3D rekonstrukci zaniklých plavebních nádrží v povodí Roklanského potoka pomocí metod bezpilotní (UAV) fotogrammetrie a GIS modelování.
- 2)** Využít přesné 3D modely nádrží k odvození batymetrických charakteristik jednotlivých nádrží.
- 3)** Porovnat výsledky batymetrického modelování z UAV dat s výsledky zjištěnými z konvenčních datových zdrojů a s historickými údaji.
- 4)** Vyhodnotit potenciál a limity UAV technologií pro rekonstrukci zaniklých nádrží v horském terénu.

Zájmové území diplomové práce představuje povodí Roklanského potoka, na kterém se nachází pět z celkem osmi zaniklých plavebních nádrží zvaných *klauzy*, nebo *švele*, vybudovaných mezi lety 1799 až 1801 v rámci Vchynicko-Tetovského plavebního kanálu. Jedná se celkem o pět nádrží – Javoří, Rokytky, Roklanská, Novohuťská a Studená, z nichž jedna se nachází na hlavním vodním toku Roklanského potoka, zbylé čtyři pak na jeho hlavních přítocích. Umístění a názvy nádrží uvnitř povodí jsou znázorněny na mapě v obrázku 2.1.

Hlavními objekty výzkumu jsou výše zmíněné malé vodní nádrže v úzkém kontextu jejich potenciálního využití v protipovodňové ochraně a UAV technologie, jež byly v práci použity pro sběr prostorových dat. Širšímu kontextu využití malých vodních nádrží v protipovodňové ochraně a přesnosti metody UAV v hydrologických nebo geografických výzkumech se pak věnuje rešeršní část. Předmětem výzkumu jsou 3D a digitální modely nádrží a z nich vyvozené batymetrické charakteristiky, které slouží k porovnání výsledků mezi modely získaných z UAV metod a z konvenčních metod.

Klíčovou technikou, využitou pro řešení práce je UAV snímání a fotogrammetrická analýza, jež umožňuje dosahovat extrémně vysoké podrobnosti při rekonstrukci krajinných prvků (Miřijovský, Langhammer, 2015; Langhammer et al., 2017; McCabe et al., 2017). Tato relativně nová a rychle se rozvíjející technologie je pro řešení cílů práce optimální s ohledem na potřebu získání vysoce přesných a aktuálních prostorových dat vzhledem k velké rozloze území hodnocených nádrží, umožňující pokrytí UAV snímáním.

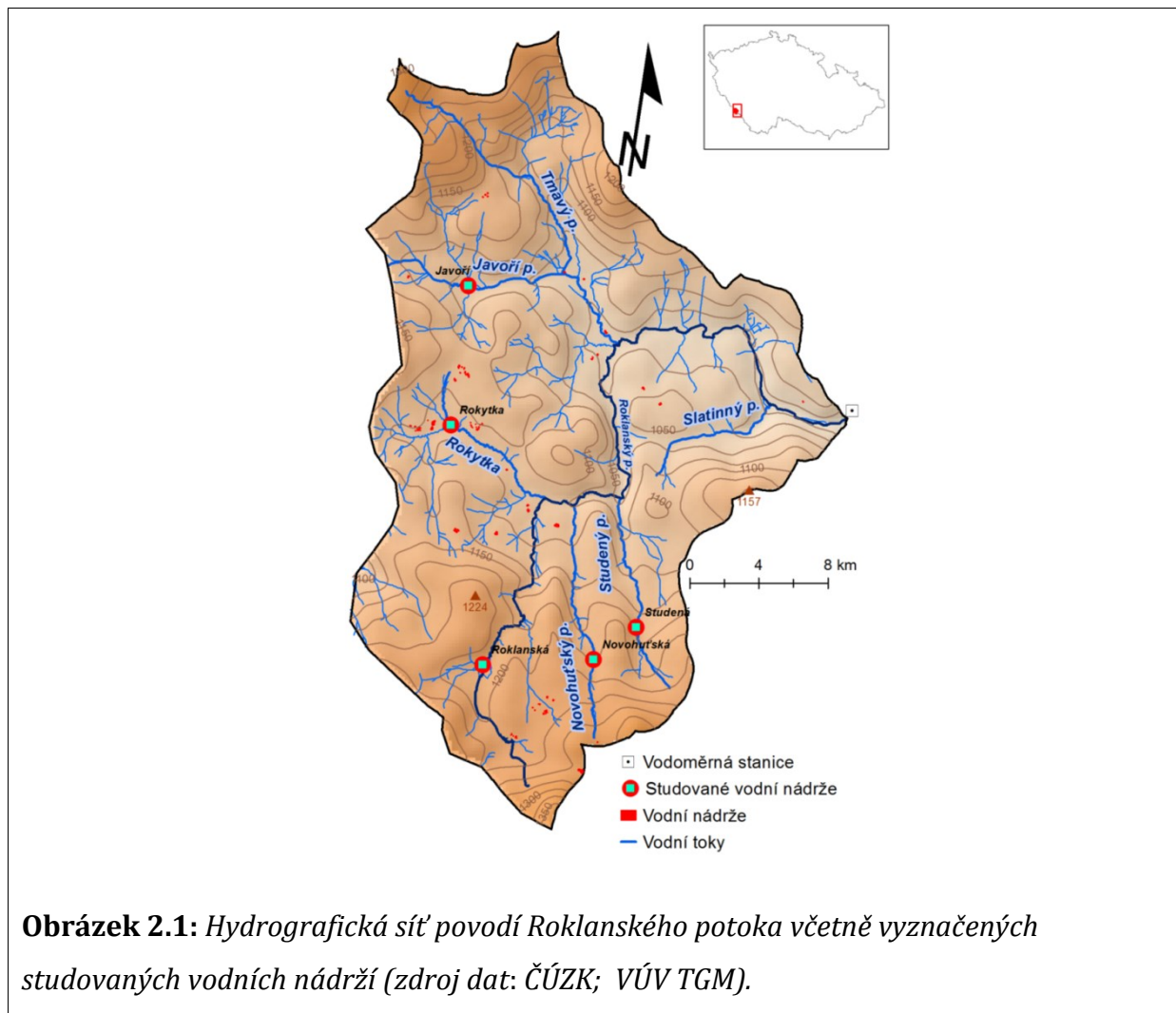
Jelikož se jedná o stále se vyvíjející technologii pro pořizování prostorové informace, která má vzhledem k povaze snímání a specifikům zájmového území řadu omezení – se práce dále věnuje rozboru a diskusi limitů využití UAV technologií pro primární sběr dat a jejich následnému zpracování v softwaru specializovaném na fotogrammetrickou tvorbu 3D modelů.

2. Fyzicko-geografická charakteristika území

2.1 Geografické a hydrografické vymezení

Povodí Roklanského potoka o velikosti 47,6 km² se nachází v jihozápadní části Česka v pohoří Šumavy, jehož název nese stejnojmenný geomorfologický celek (viz kapitola 2.3) i chráněná krajinná oblast a národní park (viz kapitola 2.6). Roklanskému potoku náleží hydrologické pořadí 4. řádu s číselným označením 1-08-01-0060-0-00, tedy jedná se o potok hlavního povodí Labe (I. řád), dílčího povodí Vltavy (II. řád) a základního povodí mezi Otavou a Volyňkou (III. řád). Délka potoka od pramene po soutok s Modravským potokem je 14,8 km, kde společně tvoří řeku Vydru v obci Modrava.

V povodí se nachází nespočet malých vodních nádrží, z čehož pět nádrží bylo uměle vytvořených pro plavbu dřeva v rámci Vchynicko-Tetovského plavebního kanálu (viz kapitola 1.4). Dvě plavební nádrže se nachází na pravostranných přítocích (Novohuťský a Studený potok), dvě na levostranných přítocích (Rokytká a Javoří potok) Roklanského potoka, pátá nádrž je situovaná přímo na hlavním toku. Všechny nádrže nesou název podle potoků, na nichž se nachází (obrázek 2.1).



Hydrologickou analýzou nad digitálním modelem reliéfu 5. generace (DMR5G) byly zjištěny rozlohy odvodňovaných území pro každý závěrový profil nádrže zvláště. Závěrové profily byly umístěny na tocích v místech hrází nebo v případě absence hráze v místě, které bylo během postupů této diplomové práce identifikováno jako pravděpodobné naleziště dřívější hráze (viz dále kap. 7.3). Hodnoty v tabulce 2.1 ukazují, že uzávěrové profily v místech nádrží dohromady odvodňují území o velikosti 1 345 ha, což představuje 28,3% plochy povodí Roklanského potoka.

Tabulka 2.1: *Odvodňené plochy v místech (potenciálně se vyskytujících) hrází všech nádrží v povodí Roklanského potoka (zdroj dat: ČÚZK)*

Nádrž	Plocha odvodňovaného území [ha]
Javoří	460
Rokytka	323
Roklanská	339
Novohuťská	80
Studená	143

2.2 Geologie

Zkoumané povodí kompletně spadá do geologické oblasti moldanubické zóny, kde se litologicky střídají metamorfované horniny prekambričského stáří a moldanubický pluton z geologické éry paleozoika. Dnešní podoba reliéfu byla v minulosti podmíněna jednak rozdílnou odolností hornin a jednak tektonickými pohyby podél mladších tektonických zlomů probíhajících ve směru SZ-JV (Mentlík, 2016). Přeměněné horniny se rozprostírají na velkých územích povodí. Jsou tvořeny hlavně migmatity a rulami, především pak pararulami (NP Šumava, cit. 2018).

Kvartérní horniny kenozoického stáří se nalézají podél hlavního toku v podobě nezpevněné hlíny, písku a štěrku, geneticky spadajících do kategorie fluviálních nezpevněných sedimentů. Pouze v bezprostřední blízkosti hlavního toku a jeho přítoků nalezneme písčito-hlinité až hlinito-písčité deluviální sedimenty. Na těchto kvartérních sedimentech se během stejného geologického útvaru vytvářejí rozsáhlé plochy rašelinišť přítomných na územích kolem potoků v povodí. Téměř u všech pramenných oblastí hlavních přítoků se nachází organická rašelina (ČGS, 1998).

2.3 Geomorfologie

Hranice zájmového povodí kompletně spadá do geomorfologické subprovincie Šumava, oblasti Šumavské hornatiny, celku Šumava a podcelku Šumavské pláně, jež se nachází v jihozápadní části geomorfologické provincie Česká vysočina v Hercynském systému na území České republiky. Geomorfologické členění reliéfu Čech (Balatka, Kalvoda 2006) zařazuje povodí do geomorfologické jednotky s kódem IB1A.

Reliéf Šumavy je výsledkem dlouhodobého působení geologicko-geomorfologického vývoje už od dob Hercynského (Variského) vrásnění, odkdy docházelo k procesům výzdvihu, zarovnávaní, opětovnému výzdvihu a postupnému rozčleňování reliéfu působením říční eroze i malých ledovců. Mikroformy Šumavského reliéfu mimo oblast povodí poukazují mimo jiné na procesy hlubokého zvětrávání v humidním tropickém klimatu během terciéru. Během pleistocénu docházelo k periglaciální modelaci všech svahů na území Šumavy i ke glaciálnímu působení horských ledovců při tvorbě morén a karů vyplněných ledovcovými jezery. V centrální části Šumavy se nachází zbytky zarovnaného a vyzdviženého povrchu v podobě rozsáhlých plání, na nichž se ve vlhkých srážkových oblastech se špatným odtokovým systémem vyskytují četná vrchoviště (Mentlík, 2016).

Horský potok protéká geomorfologickým okrskem Kvildských plání, rozprostírajících se na šumavské náhorní plošině, která je rozdělená do tří podokrsků, konkrétně Modravských, Roklanských a Zhůřských plání. Roklanský potok pramení i kompletně protéká podokrskem Roklanských plání s kódem geomorfologického členění IB1A2c. Pláně tvoří specifické vypuklé geomorfologické jednotky na Šumavě s rozsáhlými plochami vysoko položených zarovnaných povrchů (Balatka, Kalvoda, 2006).

Průměrná sklonitost svahů povodí je 5,5° (Čurda et al., 2011), což dle kategorizace sklonitosti BPEJ odpovídá mírně svažitému reliéfu. Převládající orientace svahů má severovýchodní, severozápadní a západní směr expozice. Maximální nadmořská výška Roklanských plání činí 1 375 m n. m., minimální nadmořská výška 925 m n. m., výškový rozdíl je tedy 450 m (Balatka, Kalvoda, 2006).

2.4 Půdní prostředí

Podle půdních map ministerstva životního prostředí pokrývají území povodí Vydry a Roklanského potoka především půdní typy podzolů a kryptopodzolů, sekundárně se pak na území kolem potoků vyskytují silně podmáčené glejové a organozemní půdy (Kliment, Matoušková, 2008a). Subtypy půdy konkrétně zaujímají podzoly kambické, přecházející do glejových půd ze svahovin a nivních sedimentů (Albrecht, 2003). Vzhledem k infiltračním procesům se relativní zranitelnost půd v území řadí do kategorie středně, místy pak až silně zranitelné na vyskytujících se rašeliništních organozemích (VÚMOP, cit. 2018). Obecně půdy na území charakterizuje vysoká infiltrační rychlost, malá retenční schopnost a následný rychlý odtok, a to i

v organosolech, které mají sice vysoký retenční potenciál, již ne však během stavu plného vodního nasycení (Čurda et al., 2011).

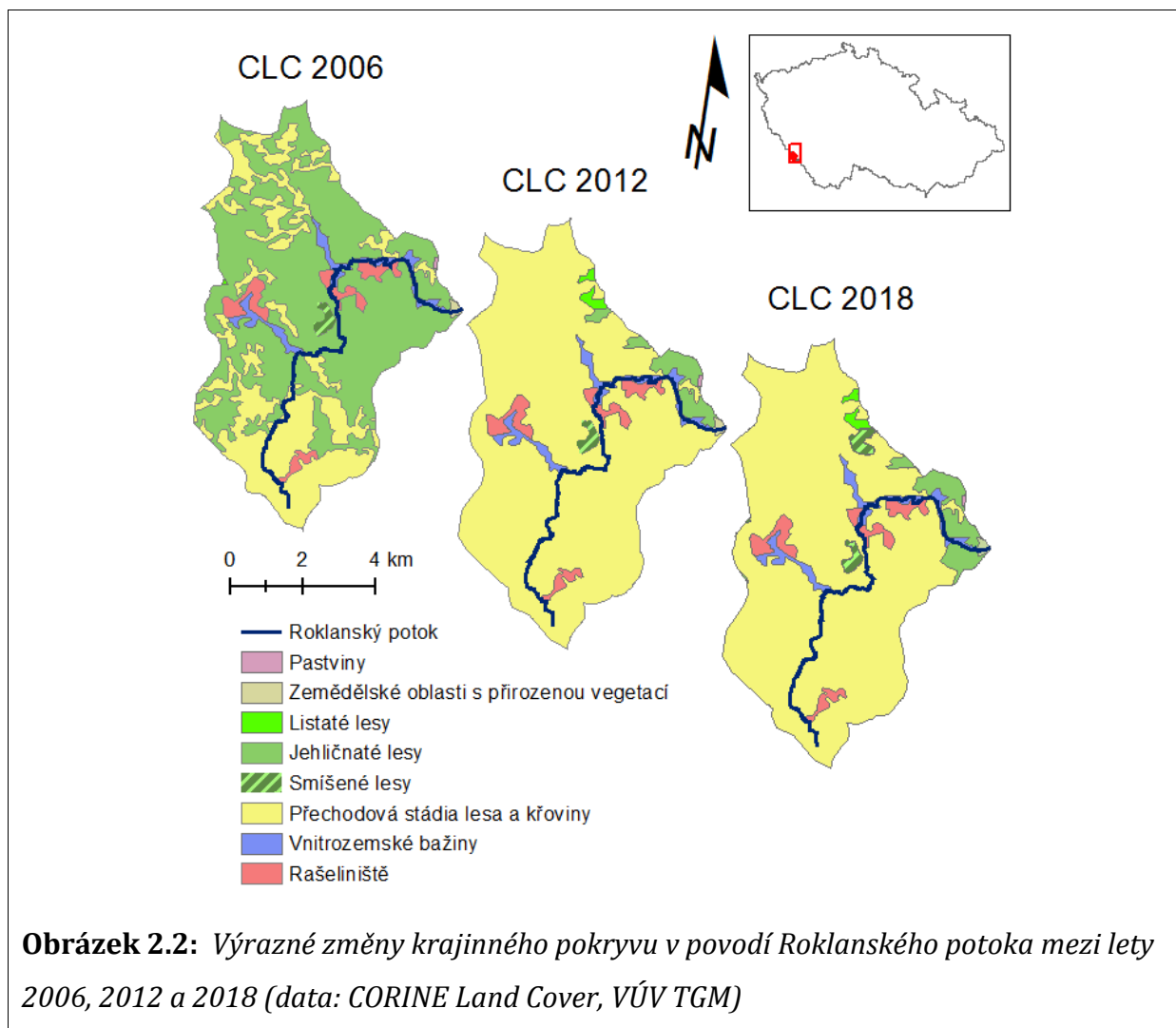
2.5 Přírodní poměry

Popis přírodní složky, resp. krajinného pokryvu, vychází z podkladů konsolidované vrstvy ekosystémů ČR (KVES), jež je kompilací pěti datových zdrojů o krajině na našem území a jež vymezuje celkem 41 kategorií krajinného pokryvu rozdělených do osmi základních typů zemského pokryvu (viz Frélichová et al., 2014).

Území povodí tvoří převážně biotop smrčín (*Picea abies*). Mezi Roklanským a Studeným potokem se rozkládá rozsáhlý biotop suchých trávníků. V blízkosti toků se rozprostírají rašeliniště s přechodem do mezofilních luk, jež jsou na velmi malých územích i hospodářsky využívané. Depresní oblasti poblíž toků vyplňují biotopy bažin a močálů. Uvnitř rašelinišť se vykytují malé, v prostoru roztroušené nádrže (Frélichová et al., 2014).

Makrostruktura krajinného pokryvu je zobrazena na obrázku 2.2. V povodí došlo ke zřetelným změnám převážně mezi lety 2006 a 2012, kde jsou vidět důsledky kůrovcové kalamity, jež v povodí zničila drtivou většinu jehličnatého lesa, čímž došlo ke snížení jeho zastoupení z 62% na pouhé 3,5%. Od roku 2012 se jehličnatý les rozšířil na pouhé 4,6% z celkové rozlohy povodí a také do té doby stagnující podíl smíšeného lesa vzrostl z 0,6% na 1,3%. Ostatní typy krajinného pokryvu zůstaly více méně beze změny.

Mimo přirozených a přírodě blízkých typů krajinného pokryvu se v povodí vyskytují antropogenní tvary v podobě již zmíněných plavebních nádrží, které v dnešní době plní spíše pasivní úlohu a postupným zánikem se mění do přírodě blízké podoby. S výjimkou plavebních nádrží a částečného zastoupení sídelní struktury obce Modrava v povodí se na území nenachází výraznější antropogenní zásahy (Kliment, Matoušková, 2008a).



2.6 Ochrana území

Z hlediska Velkoplošně zvláště chráněných území (VZCHÚ) povodí zcela spadá do chráněného území NP Šumava o rozloze 680,6 km². Důvod ochrany je shrnut v kritériích, na jejichž základě je provedena zonace CHKO. Z kritérií vyplývá obecné pojetí ochrany přírody, jakými jsou:

- dlouhodobá ochrana ohrožených a jedinečných částí přírody a krajiny;
- prezervace druhově rozmanitých společenstev;
- kontrola trendů vývoje a omezování negativního využívání přírodních zdrojů;
- podpora a uvážení vývojových tendencí krajiny, osídlení a životních jistot obyvatel území.

Do povodí Roklanského potoka zasahují I. a II. zóna ochrany, jež zakládají na výše zmíněných kritériích. První zónu definují přírodní nebo přírodě blízké pozemky na

maloplošném území, kde se nachází vysoce rozmanité a kriticky ohrožené druhy. Do podřadné druhé zóny spadají polopřírodní a polokulturní krajiny, nebo pozemky spadající do první zóny, které jsou však rozsahově menší než 3 ha. Druhá zóna zaujímá většinu území studovaného povodí. Třetí zóna s intenzivním zásahem do přirozené krajiny se kromě zanedbatelné části území obce Modrava v povodí nevyskytuje (Správa NP Šumava, 2012)

Mimo ZCHÚ je nutností zmínit existenci 65 maloplošných zvláště chráněných území (MCHÚ) v CHKO Šumava. Ty se avšak rovněž spolu s III. zónou CHKO v povodí Roklanského potoka nevyskytují.

Ochranu druhů fauny, flóry a typů přírodních stanovišť v mezinárodním měřítku komplexně zajišťuje soustava Natura 2000, jež je kompozicí směrnice č. 2009/147/ES o ochraně volně žijících ptáků a směrnice č. 92/43/EHS o ochraně volně žijících živočichů, planě rostoucích rostlin a přírodních stanovišť. Do soustavou chráněné biotické i abiotické složky přírody spadají pouze druhy nejvzácnější, nejvíce ohrožené, vzácné či endemické (Správa NP Šumava 2012).

V rámci první zmíněné směrnice byla vyhlášena ptačí oblast (PO) Šumava, v české ústavě dohledatelné jako nařízení vlády č. 681/2004 Sb. Území NP a CHKO Šumava zahrnuje inventář celkem devíti druhů ptačích oblastí, jejichž populace byly zjišťovány mezi lety 1998-2002. Z procesu zjišťování počtu populací v tomto období byl minimální počet hnízd všech populací pouze na NP Šumava odhadnut na CCA 420 hnízd, odhad maximálního počtu pak na 820 hnízd (Správa NP Šumava, 2012). Až po soutok Roklanského potoka s potokem Rokytka se rozprostírá jádrové území výskytu tetřeva (*Tetrao*, NP Šumava, cit. 2018).

Druhá zmíněná směrnice vymezuje evropsky významné lokality (EVL). Tato směrnice je implementována v nařízení vlády č. 132/2005 Sb. (příloha č. 187). Do ochranného rámce EVL Šumava celkem spadá:

- 20 typů přírodních stanovišť (biotopů), z čehož je 5 prioritních;
- 9 druhů fauny a flóry, z čehož 2 jsou prioritní.

Na území Roklanského potoka se nachází přírodní biotopy klimaxových smrčín (horské třtinové, rašelinné, podmáčené), horských vrchovišť na nepropustných podložích (otevřená, s výskytem klečí, vrchovištní šlenky) a přechodová rašeliniště (NP Šumava,

cit. 2018). Tyto rašeliništní biotopy mají také specifickou ochranu spadající do Ramsarské úmluvy o mokřadech. Roklanský potok protéká územím Modravských slatí, které zahrnují kontinuální plochu o velikosti 43,9 km², což představuje 92% rozlohy celého povodí.

Oblast povodí rovněž spadá do chráněné oblasti přirozené akumulace vod (CHOPAV), jež na území Šumavy celkem zaujímá 1 681,41 km² (HEIS VÚV TGM, 2019).

2.7 Klimatické a meteorologické poměry

Podle aktualizované mapy Köppen-Geigerovy klimatické klasifikace (Kottek et al., 2006) spadá povodí do klimatického pásu typu Cfb, tedy teplého vlhkého podnebí s teplými léty (oceánické podnebí), jež se rozprostírá přes území Čech a části Moravy. Ve starší verzi Köppen-Geigerovy klasifikace z roku 1936 je území spíše řazeno do typu Dfb – boreální vlhké podnebí s teplými léty (vlhké kontinentální podnebí). Užší specifikaci v rámci Česka udává Quittova klasifikace podnebí z roku 1971, dle níž je povodí řazeno do chladné oblasti CH4. Jelikož je hodnota průměrné teploty měsíce ledna, a tedy nejchladnějšího měsíce v roce, pro klimatickou oblast CH4 udávána v rozmezí -6 až -7 (Quitt, 1971), shoduje se tato lokální klasifikace spíše s Köppenovým typem Dfb kde průměrná teplota nejchladnějšího měsíce klesá pod 0°C na rozdíl od typu Cfb, kde průměrná teplota nejchladnějšího měsíce neklesá pod 0°C. Dle Vlčka et al. (2016) je klima oblasti variabilní a podléhá efektům oceánského i vlhkého kontinentálního klimatu.

Na území převládající jihozápadní až západní proudění v kombinaci s návětrnou orientací území vymezuje nejdeštivější lokality Šumavy – Modravu a Březník (1300 – 1600 mm; Čurda et al., 2011). Srážky ve formě sněhu tvoří čtyřicetiprocentní podíl na celkových srážkách a trvají v průměru 143 dní v roce. Klimatické trendy od 80. let 20. století v povodích Roklanského a Modravského potoka poukazují na nárůst průměrné roční teploty vzduchu o 1,5 °C, úbytek sněhových srážek, snížení výšky sněhu a snížení počtu dní se sněhovou pokrývkou (Langhammer et al., 2015).

Tabulka 2.2: Průměrné hodnoty základních klimatických prvků pro studovanou oblast (zdroj dat: Tolasz et al., 2007).

Prvek	Hodnota
Průměrná roční teplota vzduchu	3 °C
Průměr ročních maxim teploty vzduchu	28°C
Průměr ročních minim teploty vzduchu	-21°C
Průměr ročních úhrnů srážek	>1 200 mm
Srážkové dny v roce	170 – 190
Dny se sněhovou pokrývkou	>150
Typ klimatické oblasti	CH

2.8 Hydrologické poměry

Hydrologické charakteristiky pro Roklanský a Modravský potok monitoruje ČHMÚ v hlásném profilu č. 112 ve stanici Modrava, která je zároveň závěrovým profilem pro tyto dva potoky. Průměrný roční průtok v hlásném profilu Modrava k datu 20.1.2019 činí 3,01 m³/s, průměrný roční stav pak 57 cm, přičemž nula na vodočtu se nachází v 973,28 m n. m. (ČHMÚ, 2019).

Stupně povodňové aktivity včetně sucha jsou vymezeny dle následujících vodních stavů a jim příslušných průtoků:

- sucho – 45 cm
- I. SPA – 120 cm (30,5 m³/s)
- II. SPA – 140 cm (41,2 m³/s)
- III. SPA – 160 cm (54,6 m³/s)
- III. SPA (extrémní povodeň) – 218 cm (101 m³/s)

Vyvozené N-leté průtoky pro hlásný profil stanice Modrava jsou znázorněny v tabulce 2.3. Nejvyšší historicky zaznamenané vodní stavy, resp. průtoky, překročily Q₁₀₀ celkem 8x, a to 3x během zimních měsíců a 5x během letních měsíců (graf 2.1). Koncentrovaný výskyt vod s 5letým a vyšším průtokem byl zaznamenan v období 1979-1981 a 1988-

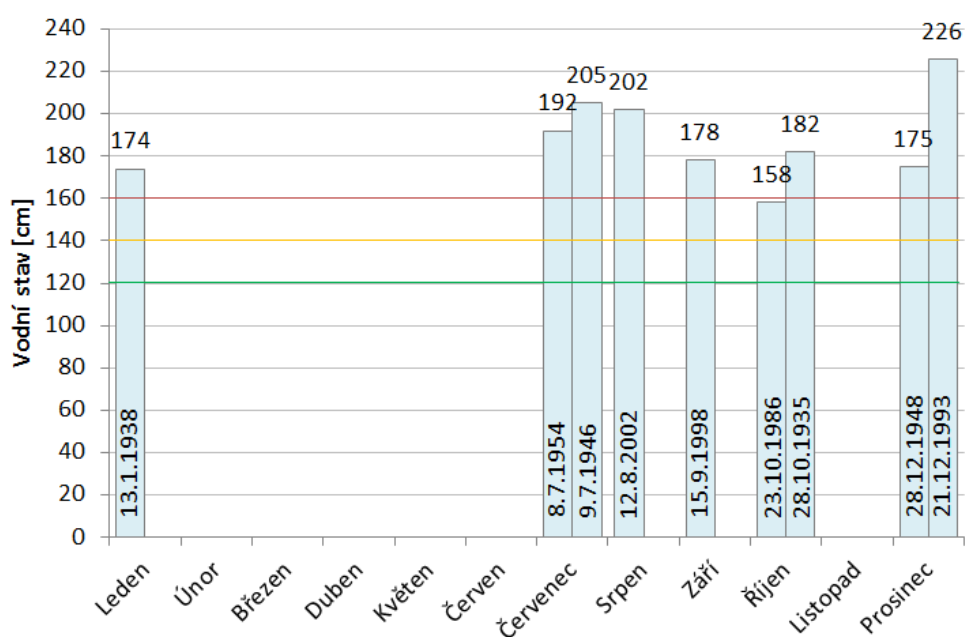
1994, avšak tento relativně krátkodobý trend se na dlouhodobém odtokovém trendu významně neprojevil (Kliment, Matoušková, 2008a). Měsíční kumulativní hodnoty průtoků a srážek mezi lety 1961-2010 nevykazují žádnou výraznou změnu ve srážko-odtokovém procesu, ale změna se projevuje v postupném poklesu přímého odtoku a pomalého nárůstu základního odtoku v poměru k celkovému odtoku od 80. let minulého století. Dalším výrazným trendem je sezónní přesun podílu celkového odtoku z letních měsíců do jarních měsíců (Langhammer et al., 2015).

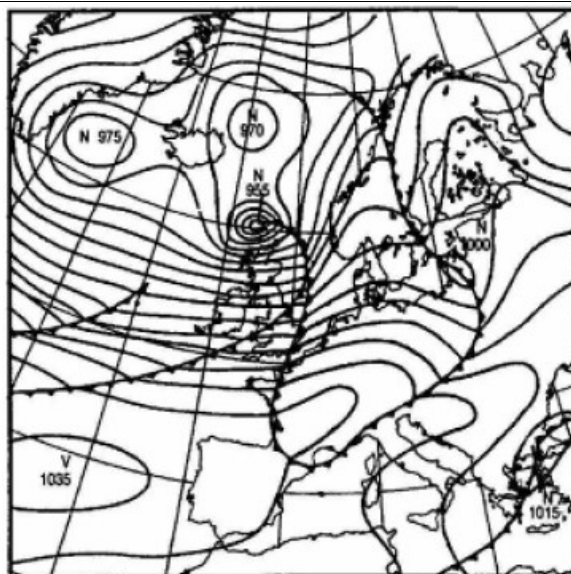
Pro profil Roklanského potoka existuje konsumpční křivka zkonstruována pomocí hydrologického modelování z menšího množství naměřených dat (graf 2.2; Kabelka, 2016). Autor upozorňuje na podhodnocení vodních stavů nižších než 46 cm a nadhodnocení vodních stavů nad 57 cm pravděpodobně vlivem sklonu hladiny (viz Kabelka, 2016).

Tabulka 2.3: *N-leté průtoky pro hlásný profil stanice Modrava (zdroj: ČHMÚ, 2019; Povodí Vltavy, 2019)*

Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
29 m ³ /s	38 m ³ /s	52 m ³ /s	65 m ³ /s	79 m ³ /s	101 m ³ /s	120 m ³ /s

Graf 2.1: *Histogram nejvyšších zaznamenaných vodních stavů dle evidenčního listu hlásného profilu č. 112. Zelená linie: I. SPA, žlutá linie: II. SPA, červená linie: III. SPA (zdroj: ČHMÚ, 2019).*





Obrázek 2.3: přízemní povětrnostní podmínky západní cyklonální synoptické situace
(zdroj: Skřehot, 2006)

Profil Vydra-Modrava čítal mezi obdobími 1931–2007 celkem 104 povodní přesahujících hodnotu $Q_1 = 29 \text{ m}^3/\text{s}$. Tyto průtoky měly nejčastější výskyt během prosince a května (sezónní index $P_i = 0,14$). Povodní s průtokem větším než $Q_2 = 38 \text{ m}^3/\text{s}$ se ve stejném období vyskytlo celkem 48 se sezónním indexem během listopadu a prosince ($P_i = 0,17$). Povodně s větším průtokem než $Q_5 = 52 \text{ m}^3/\text{s}$ vykazovaly největší sezonalitu ($P_i = 0,15$) v říjnu i červnu (Vlasák, 2008 in Čurda et al., 2011). Výsledky ukazatelů znázorňují výskyty povodní v pozdních podzimních měsících vlivem západní cyklonální situace a během jarních měsíců vlivem tání sněhu.

2.9.2 Kůrovcová kalamita

Vlivem lidského zásahu na území Šumavy došlo k úbytku listnatých dřevin, což vedlo ke snížení stability porostů a následným disturbancím v podobě kůrovcové kalamity na přelomu 60. a 70. let 19. století. Vlivem extrémních větrných situací mezi lety 1983 a 1984 došlo k polomům, jejichž špatným zpracováním v kombinaci s jihozápadními větry došlo k postupnému zanášení i množení kůrovců z taktéž větrem postižené německé strany. Od roku 1988 probíhaly asanace proti lýkožroutem-způsobeným škodám až do vyhlášení NP Šumava roku 1991, kdy byly asanace přerušeny. To vedlo k mírnému nárůstu kůrovcové aktivity mezi lety 1992 a 1994 až k náhlé kulminaci kůrovcové aktivity v roce 1996, kdy bylo zničeno až $200\,000 \text{ m}^3$ smrkového dříví. Ke stabilizaci docházelo mezi lety 2002 až 2007, jelikož dřeviny v bezzásahové zóně již

odumřely. Prudký nárůst kůrovcem vytěženého dřeva nastal od roku 2008 a dosáhl vrcholu v roce 2010, kde bylo zasaženo až 375 000 m³ smrkového dříví. Pokles aktivity lýkožrouta probíhal až do roku 2014 (Zahradník, 2015). Drastický úbytek jehličnatého lesa ve prospěch zastoupení nízkého porostu v tomto období lze vidět i na mapovém zobrazení krajinného pokryvu studovaného povodí na obrázku 2.2.



Obrázek 2.4: *Projev kůrovcové kalamity v NP Šumava.*

II. REŠERŠNÍ ČÁST

3. Návaznost na předešlé hydrologické práce ve studované oblasti

Odezva na extrémní povodně v Čechách v srpnu roku 2002 byla započata formou výzkumu se zaměřením na ovlivnění průběhu a intenzity povodní antropogenním zásahem do přirozeného prostředí vodních koryt v oblasti Šumavy (Langhammer, Vilímek, 2007). Analýzou koryta Otavy se prokázalo, že přímé zásahy do říčního koryta mají malý vliv na extremitu povodní v porovnání s krajinným pokryvem a strukturami v nivách, které zhoršují průběh povodní vlivem umělého zadržování a náhlého vypuštění objemu vody při zhroucení či překonání těchto struktur, jakými jsou např. železniční násypy, malé mosty a propustky (Langhammer, Vilímek, 2007).

Na hydromorfologickou analýzu povodí Otavy navazují hydrologické výzkumy srážko-odtokového režimu v povodí Otavy i jejích dílčích povodí ve vztahu ke kombinaci klimatu, krajinného pokryvu a lidského zásahu (Kliment, Matoušková, 2008a; 2008b), vlivu rašelinišť na odtokové procesy v pramenných oblastech Šumavy (Janský, Kocum, 2008; Vlček et al., 2012; Vlček et al., 2016), vlivu fyzicko-geografických faktorů na extrémní povodně (Čurda et al., 2011) či vztahu odtokové odezvy na klimatické změny a lesních disturbancí (Langhammer et al., 2015). Obecné shrnutí vyplývající z výše zmíněných výzkumů retenčního potenciálu krajiny na Šumavě lze shrnout do následujících bodů:

- změna rozdělení ročního odtoku ve prospěch zimních měsíců od poloviny 70. let 20. století a postupné snižování výšky sněhové pokrývky včetně počtu dní se sněhovou pokrývkou vlivem růstu průměrné teploty vzduchu (Kliment, Matoušková, 2008a; 2008b; Langhammer et al., 2015);
- mezi lety 1992 – 2002 postupně klesá výměra orné půdy na úkor nárůstu luk a lesa, čímž je zvyšována i retenční schopnost krajiny (Kliment, Matoušková, 2008a);
- povodí s výrazným podílem rašeliništní plochy vykazuje vyšší variabilitu odtoku v závěrovém profilu, především ve vzhledu k vyšším frekvencím kulminačních průtoků, naopak povodí s nižším podílem rašelinišť má vyšší retenční potenciál (Janský, Kocum, 2008);

- hrazené meliorační kanály, které odvodňují vrchoviště, stabilizují rozkolísanost ročního průběhu odtoku během průměrných vodností, avšak pouze do jisté úrovně N-letosti průtoků, nad níž již dochází ke zvýšení odtokové extremity (Čurda et al., 2011);
- hladina podzemní vody ve vrchovištích reaguje na jejich vývojová stádia, kdy při nízké hladině podzemní vody vrchoviště zvyšují retenční potenciál krajiny, avšak již při průměrné hladině podzemní vody vykazují velmi malou retenční schopnost, která je navíc umocňována v situacích minimálního propojení vrchoviště s přilehlým odvodňujícím tokem (Vlček et al., 2012);
- zdvojnásobení událostí kulminačního průtoků s přesunem frekvence z pozdního jara do včasného jara/pozdní zimy; snížení počtu událostí s nízkým průtokem o dvě třetiny s přesunutím sezónního odtokového režimu z podzimu na polovinu zimy; komplexní korelovaný vliv lesních disturbancí a klimatických změn (Langhammer et al., 2015).

V návaznosti na publikované výsledky srážko-odtokového režimu pramenných oblastí Šumavy probíhá výzkum zaměřený na retenční potenciál pramenných oblastí z hlediska hodnocení lesní i nelesní půdní retence (Královec et al., 2016), využití retenčního potenciálu rašelinišť (Vlček et al., 2012; Vlček et al., 2016) a poldrů.

4. Vodní nádrže

4.1 Definice a rozdělení

Obecně vzato lze vodní nádrže chápat jako vodní útvary s přirozenou nebo umělou akumulací vody, jejichž základními parametry jsou objem, zatopená plocha a míra kolísání hladiny během provozu (Povodí Moravy, cit. 2018). Kratochvíl (1961) definuje vodní prostor vytvořený přehradní stavbou zadržující vodu pro vodohospodářské potřeby. Prostor vodní nádrže v příčném profilu hrazeného toku je vymezen nejnižším bodem v údolí toku a maximální hladinou vzdutou od původní vodní hladiny. Maximální zádržný prostor nádrže v podélném profilu je vymezen korunou hráze a průsečíkem vzduté hladiny s nevzdutou hladinou toku (Kratochvíl, 1961). Dimenze zkoumaných zaniklých plavebních nádrží na Šumavě (tzv. *klauzy* nebo *švele*) velikostně spadají do kategorie malých vodních nádrží (MVN), jež jsou definovány podle aktualizované normy ČSN 75 2410 z roku 2011 nahrazující normu z roku 1997. Norma vyčleňuje malé vodní nádrže se sypanou hrází podle následujících kritérií:

- objem nádrže mezi dnem a hladinou ovladatelného prostoru je menší/roven 2 mil. m³;
- maximální hloubka nádrže je rovna 9 m.

Dále norma zahrnuje pouze takové malé vodní nádrže, jejichž přítok a odtok dna a svahů nevedou propustným horninovým prostředím (ČSN, 2011).

Dle normy ČSN 75 2410 jsou MVN rozděleny do devíti základních typů. Kompletní výčet lze nalézt v tabulce 4.1 níže. Kratochvíl (1961) ve své monografii přehledně rozděluje vodní nádrže podle vertikálního umístění (povrchové, podpovrchové), horizontálního umístění vůči toku (údolní nádrže, boční nádrže), vodohospodářských potřeb (velké užitkové, menší hospodářské, rybníky) a účelu (ochranné, zásobní, vyrovnávací, smíšené). Důraz je také kladen na soustavu menších nádrží v horských polohách, které nabývají vysokého energetického a vodohospodářského účinku v případě vhodné regulace odtoku na jednotlivých tocích (Kratochvíl, 1961).

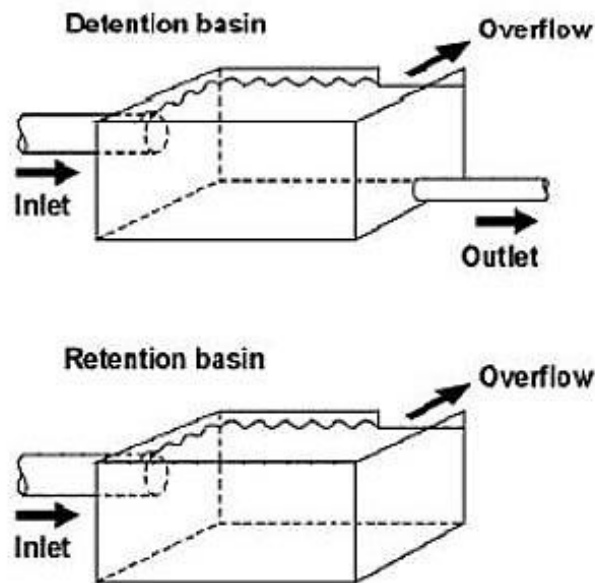
Tabulka 4.1: *Typy malých vodních nádrží a jejich formy (zdroj: Pojsl, 2017).*

Typ MVN dle funkce	Formy nádrží
Ochranné	vsakovací, suché ochranné
Zásobní	vodárenské, závlahové, energetické
Upravující vlastnosti vody	usazovací, chladící, aerobní biologické
Rybochovné	sádky, plůdkové výtažníky, výtěrové rybníky
Hospodářské	protipožární, chov vodní drůbeže, napájecí a plavící
Se speciálním účelem	splavovací, přečerpávající, závlahové
Rekreační	přírodní koupaliště, plavecké
Asanační	záchytné, umělé, otevřené vyhnívací
Krajinotvorné nádrže a nádrže v obytné zástavbě	hydromeliorační, okrasné, umělé mokřady

Účel MVN spočívá ve zlepšování vodního režimu v jejich bezprostřední blízkosti. V případě šumavských klauz by se hlavně jednalo o dvě vodohospodářské funkce, jež jsou přidělené specificky menším hospodářským nádržím: (1) zadržení vody pro zvýšení

vodní hladiny podzemní vody na přilehlých pozemcích v období sucha a (2) zásobování vodou koryta horských potoků při plavení dříví (Kratochvíl, 1961). Druhá z těchto vyjmenovaných funkcí u MVN na území Šumavy zanikla. Konkrétní tvar hráze a prostor nádrží je pak předmětem pro jejich další technické členění. V tomto případě jsou vodní nádrže děleny podle způsobu vzniku akumulativního prostoru, v němž se navíc vyčleňují vertikální pásma (Šálek in Leipeltova, 2010).

Zadržování a upouštění vody v akumulativním prostoru nádrže je důležité v kontextu regulace příslušného objemu během epizod povodní či sucha. Zádržný prostor tvoří s přilehlým tokem otevřený systém. Tyto dva objekty jsou od sebe odděleny hrází, jejíž koruna je během kulminačních průtoků záměrně překonána za účelem prevence dosažení nebezpečného vodního stavu níže podél toku (Soong et al, 2009). Anglická literatura uvádí přídavné označení retenční (z angl. *retention*) a detenční (z angl. *detention*) nádrž (*basin*). Souhrnné označení těchto dvou typů je v anglickém jazyce udáváno jako *storage basin*, tedy volně přeloženo jako *akumulativní nádrž*. Retenční nádrž obsahuje stálý nadzemní objem vody, který reaguje na přítokové a odtokové poměry přilehlých oblastí. Detenční nádrž neobsahuje vodu, čímž slouží jako dočasná zásobárna vodního objemu během zvýšených průtoků za účelem snížení rychlosti průběhu povodňových vln (LCCD, 2016). V případě kontroly odtoku u detenčních nádrží je důležité, aby objem zadržené vody nepřesáhl kapacitu nádrže (Soong et al., 2009). Bližší schematické porovnání znázorňuje obrázek 4.1. V české literatuře se velmi často používá označení *suchý poldr* pro detenční nádrže a *řízený poldr* pro nádrže retenční (Čurda et al., 2011).

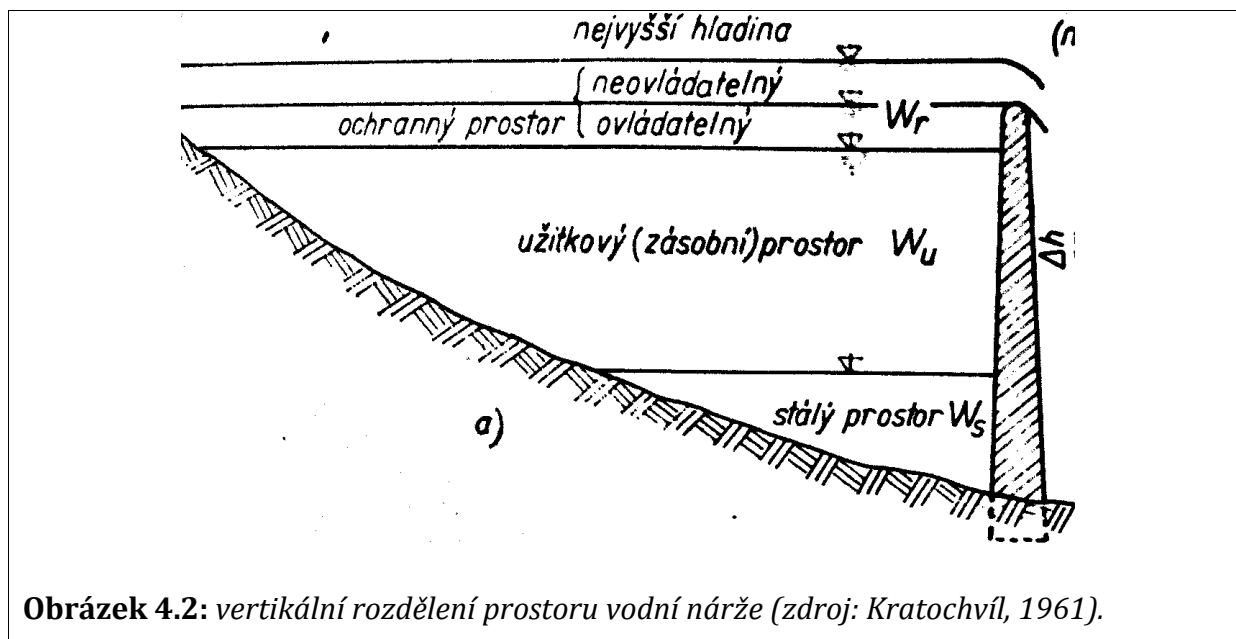


Obrázek 4.1: Funkční schéma detenčních a retenčních nádrží (zdroj: <http://www.sswm.info/content/retention-basin>)

U velkých vodních nádrží se rozlišují tři hlavní prostory zadržování objemu vody (obrázek 4.2):

- **ochranný prostor** (*retenční*) slouží ke snížení kulminační vlny;
- **užitkový prostor** (*zásobní*) akumuluje vodu použitelnou pro vodohospodaření;
- **stálý prostor** s trvalým napuštěním (Kratochvíl, 1961).

Malé vodní nádrže mají vyčleněný akumulací prostor v závislosti na jejich typu. Za běžných podmínek je v retenčních nádržích zastoupen minimálně stálý prostor, detenční nádrže zase disponují převážně ochranným ovladatelným nebo neovladatelným prostorem, přičemž užitkový i zásobní prostor absentují vzhledem k nepermanentní přítomnosti vody v nádrži.



Obrázek 4.2: vertikální rozdělení prostoru vodní nádrže (zdroj: Kratochvíl, 1961).

Hlavní faktory rozhodující o účinnosti záchytného prostoru jsou objem nádrže, objem vody do prostoru přitékající, vypouštěcí poměr (*release rate*), čas potřebný k odtoku z nádrže, půdní prostředí, hydrologické a klimatické podmínky. V případě detenčních prostor je vypouštěcí poměr závislý na přitékajícím objemu vody z povodí a zvoleném účelu konkrétní nádrže, kterým může být buďto zmírnění následků odtoku kulminační vlny, nebo kontrola doby jejího trvání (Soong et al., 2009).

Zákonitě platí rovnováha uvnitř hydrologického cyklu mezi přírůstkem a úbytkem vody do/z vodní nádrže o jakékoliv velikosti. Jinými slovy poměr úbytku vody z vodní nádrže se musí rovnat jejímu dodání. Při narušení této rovnováhy dochází k nárůstu vodního objemu v jedné vodní nádrži na úkor jiné. Průměrná doba trvání, kterou vodní molekula stráví uvnitř v jakékoliv nádrži, se obecně nazývá doba setrvání, jež lze vypočítat podílem objemu vody v nádrži a mírou nahrazení objemu vody. Doba setrvání je přímo úměrná velikosti nádrže, čili pro malé vodní nádrže je doba setrvání obecně krátká a nahrazení vodního objemu probíhá relativně rychle (Sverdrup, Armbrust, 2009). Velké vodní nádrže vykazují zanedbatelný efekt při příbytku nebo úbytku relativně malého vodního objemu, kdežto malé vodní nádrže postihují výrazné změny při totožném objemu (Sverdrup, Armbrust, 2009).

Yang et al. (2011) uvádí celkem 40 parametrů, které rozdělují retenční nádrže do různých typů. Nejvíce podstatné parametry zahrnují strukturu nádrže, hydrologii, topografii a ekosystémovou ochranu. Scholz a Sadowski (2009) vypracovali systematické dělení udržitelných povodňových retenčních nádrží (z angl. *Sustainable*

Flood Retention Basin, SFRM). Ty dělí do šesti skupin pomocí metody shlukové analýzy 34 kvalitativních a kvantitativních proměnných. Dělení je následující:

- Hydraulická protipovodňová retenční nádrž (HFRB);
- Tradiční protipovodňová retenční nádrž (TFRB);
- Udržitelný protipovodňový retenční mokřad (SFRW);
- Estetická protipovodňová úprava mokřadu (AFTW);
- Integrovaný protipovodňový retenční mokřad (IFRW);
- Přirozený protipovodňový retenční mokřad (NFRW).

Kromě parametrů je často opomíjeným tématem volba umístění nádrží na území povodí (Bellu et al., 2015). Z hlediska prostorového rozmístění můžou být akumulární nádrže souhrnně zařazovány do skupiny tzv. decentralizované protipovodňové ochrany (*decentralised flood protection*), která spočívá na rozmístění technických protipovodňových opatření v různých částech povodí, namísto koncentrovaného budování velkých technických struktur níže podél toku (Reinhardt et al., 2011). V procesu potenciálního umístění MVN je třeba vzít v potaz technické, ekonomické, ekologické a sociální aspekty navrhovaných území (Fedorov et al., 2016). Vyhodnocení nejvhodnějšího umístění nádrží obecně zakládá na studii území skládající se z následujících základních úkonů (Cole 1975 in Shaw, 1994):

- a) topografický průzkum za účelem stanovení plochy a objemu nádrže;
- b) geologický průzkum v místě hráze;
- c) hydrologické vyhodnocení průtoků vodních toků v místě stavěné hráze pro uzavřenou nádrž;
- d) posouzení nezbytných změn krajinného pokryvu a výnosné hodnoty nádrže;
- e) předpokládané náklady.

Umístění decentralizovaných vodních nádrží v pramenných oblastech vodních toků je považováno za perspektivní praxi pro (1) efektivní kontrolu povodní; (2) poskytnutí dodatečného povrchu i objemu pro přebytečnou povodňovou vodu a (3) kompenzaci nepříznivých vlivů na vývoj regionu níže podél toku (Wang, Yu, 2012 in Fedorov et al., 2016).

4.2 Hrazení nádrží

Hrazení vodních nádrží různých velikostí je klíčovou komponentou povrchových údolních nádrží k zadržování adekvátního objemu vody. Hráze sestávají ze soudržných či nesoudržných materiálů, jež jsou voleny vzhledem k hydrotechnickým i jiným požadavkům navrhované nádrže.

Hráze a přehrady z nesoudržného materiálu jsou budovány z rozložených menších nebo větších zrn místních hornin bez pojiva. Dělení je následující (Kratochvíl, 1961):

- **zemní sypané přehrady** ze zhutněných zemin volených na základě fyzikálních, mechanických a geotechnických zkoušek;
- **naplavované zemní přehrady** z hydromechanicky rozmělněné zeminy s jemnozrnným jádrem;
- **kamenité přehrady** ze sypaného nebo rovnaného lomového kamene s volnými dutinami;
- **smíšené přehrady**

Hráze a přehrady ze soudržného materiálu zastupují vesměs přehradní zdi z betonu. Hlavní funkce spočívá v přenosu vnějších sil působících na soudržnou přehradní konstrukci do základové horniny nebo do boků údolí. Soudržné přehradní zdi jsou děleny následovně (Kratochvíl, 1961):

- **gravitační přehrady** o velké tíze přenášející tlak vody do základové horniny a hrubým průřezem hráze;
- **klenbové přehrady** s přenosem zatížení do únosných opěr nebo do boků údolí a tenčím průřezem hráze;
- **členěné přehrady** rozčleněny více nosnými prvky v podobě hradícího tělesa a soustavy pilířů, které přenáší zatížení do podloží;
- **zvláštní druhy přehrad** vyrobené z jiných soudržných materiálů (kovové, prefabrikovaný materiál, atd.).

Hráze šumavských klauz spadají do kategorie zemních sypaných přehrad s nízkou výškou do 30 m (Kratochvíl, 1961).

4.3 Rizika spojená s retencí vody

Akumulace vody v nádržích představuje nejen hledisko výhod kontroly odtoku, ale také zodpovědnost jejich provozu, především pak během náhlých událostí představujících riziko pro oblasti položených níže podél toku pod nádrží. Za jednu z nejčastějších příčin lze považovat přírodní hazardy, v našich zeměpisných podmínkách hlavně hazardy hydrometeorologického původu. Konkrétní rizika s přímým dopadem na zadržování vody jsou spojená s vydatnými srážkovými úhrny či táním sněhu na sklonku zimního a jarního období, následkem čehož dochází k překročení průtočné kapacity koryta, nebo ke zmenšení průtočnosti koryta jeho ucpáním vlivem ledových jevů.

Dle údajů Mnichovské zajišťovny z roku 1997 zapříčinily povodně ze všech přírodních ohrožení globálně největší, konkrétně třetinový podíl na ekonomických ztrátách v 90. letech 20. století. Mezi lety 1986 – 1995 měly povodně navíc na svědomí 55% ze všech úmrtí (Wisner et al., 2004). V případě povodňových událostí je riziko zadržování vody za účelem zmírnění kulminační vlny spojováno spíše s velkými vodními nádržemi. Tabulka 4.2 shrnuje vybrané případové studie selhání velkých vodních nádrží pouze s hydrometeorologickými či antropogenními příčinami podle výzkumné práce Pearce (2001) a monografie Wisnera et al. (2004).

Tabulka 4.2: Přehled historických katastrofálních selhání velkých vodních nádrží

Rok	Přehrady	Lokalita	Příčina	Znamé následky
1975	Grand Tenton	Idaho, USA	Protržení nepevné hráze	14 mrtvých, 8 000 zničených domovů
1975	Banqiao	Henan, Čína	Přelití hráze vlivem tajfunu	20 000 mrtvých
1998	řeka Kugart	Suzak, Kyrgystán	Přelití hráze vlivem tání sněhu	>1 000 zničených domovů
1998	Kuban-Kel	Uzbekistán	Protržení hráze vlivem tání ledovce	43 mrtvých, 6 zničených vesnic
1998	Benanga	Samarinda, Indonézie	Přelití hráze vlivem silného deště	10 mrtvých, 100 000 evakuovaných
1998	Laureles, Concepcion, Laguna de Pescado	Tegucikalpa, Honduras	Přelití hráze vlivem hurikánu	>1 000 mrtvých
1999	Kainji, Shiroro, Jebba	Niger	Nouzové otevření přelivu	39 mrtvých, 80 000 lidí bez domova
1999	Bagre a tři další přehrady	Ghana	Nouzové otevření přelivu	48 mrtvých, 40 zatopených vesnic
1999	La Esperanza	Hidalgo, Mexiko	Nouzové otevření přelivu	100 mrtvých, tisíce lidí bez domova
2000	La Mesa	Luzon, Filipíny	Nouzové otevření přelivu	Částečné zatopení hlavního města Manila
2000	Roxsagar	Andhra Pradesh, Indie	Protržení přehrady z monzunových dešťů	40 000 lidí bez domova
2000	čtyři přehrady	Bangladéš	Nouzové otevření přelivu	>1 000 mrtvých, milión zničených domů
2000	Kariba	Mozambik	Nouzové otevření přelivu	Desetitisíce zničených domů

Porovnání velikosti malých vodních nádrží s velkými, jejichž objem může následkem přelití koruny hráze, jejím protržením nebo nesprávným vypuštěním množství vody způsobit katastrofální dopady, dává na první pohled neměřitelné výsledky. Celkový objem všech Šumavských klauz je rozprostřený na vedlejších přítocích povodí a netvoří tak velkou hrozbu z koncentrovaného odtoku velkého akumulovaného objemu. Je nutné si však uvědomit riziko lokálního rozměru, které jednotlivé klauzy mohou představovat, zejména pak v kontextu klimatických změn v našich klimatických podmínkách. Všechny příčiny ohrožení uvedené v tabulce 4.2 mají reálný výskyt na území Šumavy, i když v menším měřítku. Proporční rozměry v případě povodní z tání něhu a extrémních srážek sice nezpůsobí škody stejně velkých rozměrů, jak je ilustrováno v tabulce, ale dokáží přinejmenším vyvinout přiměřené potenciální zatížení na hráz retenčních prostor. Proto je třeba do budoucna brát v potaz návrh jejich případného zahrazení ve vztahu k hrozbám za účelem minimalizace rizika níže podél toku. Tabulka navíc uvádí špatné manipulační praktiky s výpustí hráze jako častou příčinu následné povodňové katastrofy, což navádí na otázky, jakým způsobem ovládat výpust' nádrží ve vztahu k náhlému výskytu extrémních hydrometeorologických událostí v horských oblastech.

Shrnutí bezpečnostních rizik retenčních nádrží na základě výzkumů několika autorů provedla organizace Delaware Riverkeeping Network. Zvýšená rizika úrazů nastávala hlavně v případě vybudování retenčních prostor uvnitř urbanizovaných oblastí, kde jsou nádrže umístěny v blízkosti neadekvátních krajinných pokryvů, jakými jsou např. dopravní tepny, obydlené oblasti, školy a hřiště (Jones et al., 2013). Spousta závěrů těchto autorů se týká hlavně lokality umístění retenčních nádrží ve vztahu k riziku, především pak v již zmíněných urbanizovaných územích. Nicméně poznatky spojené s minimalizací rizika retenčních nádrží, které lze uplatnit i v případě rekonstrukce zaniklých plavebních nádrží v pramenných oblastech Šumavy, se týkají především jejich návrhu. Níže uvedený výčet poznatků uvádí hazardy a rizika, které je třeba brát v potaz v návrhové části MVN v povodí Roklanského potoka:

- pozemní násypy kolem nádrží podléhají erozi a při překročení kritického průtoku případně selhávají (ASCE, 2013);
- potenciální ledové jevy vyskytující se v MVN (Chaplin, 2003), především pak v zasněžených horských oblastech Šumavy v zimních měsících;

- široce otevřená výpusť představuje v porovnání s výpusť v podobě propustku nebo úzké trubky sice daleko menší riziko nebezpečí spjaté s tlakem objemu vody vyvíjenému na výpusť, ale efektivně nesplňuje funkci zpomalování odtoku (Shinde, 1997);
- špatný návrh v ohrazení nádrží zvyšuje možnost jejich zanášení cizorodým materiálem (Liebl, 2006) a splaveninami, přičemž ohrazení obecně představuje více nebezpečných faktorů, než jakým se snaží zabránit (Chaplin, 2003; Jones et al., 2013; Liebl, 2006).

Na primární ohrožení související se selháním funkce zadržování naplněného akumulacího prostoru navazují ohrožení sekundární a dlouhodobé dopady po událostech. Mezi ně lze zařadit např. kontaminaci toků chemickými látkami nebo odpadem či změny podmínek ekosystémů a lidské společnosti vlivem ztráty nebo změny krajinného pokryvu. Naproti těmto hazardům jde zranitelnost lidské populace, která osídluje záplavové oblasti a zvyšuje tak riziko katastrofy. Sídlní komunity, zemědělci a průmyslníci obecně vyhledávají benefity povodní, jakými jsou například zavlažování či regenerace vodních ekosystémů. V mnoha zemích zranitelnost populace žijící v záplavovém území zvyšuje podíl chudé komunity s nedostatečnou efektivní obranou, jež nedisponuje alternativním útočištěm, a nemá tedy jinou možnost, než v těchto oblastech zkusit přežít (Wisner et al., 2004). Ke zvýšení rizika přispívají i politiky některých států, jež podporují výstavbu v záplavových územích níže po toku pod hrází, jako tomu bylo například v případě záplav v Mozambiku v roce 2000 (Pearce, 2001).

Bellu et al. (2015) zmiňují výrazný negativní efekt systému detenčních nádrží v zadržování sedimentů a transportovaných živin za hrázemi. Sedimentace v nádržích přispívá ke zvýšení hloubkové erozivní aktivity podél toku pod hrázemi. Zadržování důležitých živin, především fosforu a dusíku, přispívá k eutrofizaci a následnému ohrožení sensitivních ekosystémových druhů. Obecně kvalita vody v akumulacích nádržích závisí jednak na jejich umístění v sekci podélného profilu vodního toku ve vzdálenosti od zdrojů znečištění, ale jednak také na narušení podmínek v pramenných oblastech, závislých na činitelích lesního hospodářství, požárů, nebo konfliktů v použití krajinného pokryvu (Bellu et al., 2015). Tyto fakta jsou zřejmě nejdůležitějšími z pohledu revitalizace šumavských klauz, jelikož potenciálně ohrožené území chráněných složek ekosystému v NP Šumava zabírá majoritní území v okolí těchto klauz,

zatímco osídlené obce čelí minoritnímu riziku v případě zajištění bezpečnosti manipulace obnovených klauz během extrémních srážkových situací. Naproti tomu benefitem detenčních nádrží může být potenciální poskytnutí stanoviště pro populace komárů, jež může mimo jiné podporovat okolní ekosystém (Hansen, 2011; Metzger, 2004).

Hlavními vlastnostmi dopadu detenčních nádrží na přírodně-technický systém jsou krátkodobě trvající vysokorychlostní procesy a nestabilita těchto procesů. Nejčastěji se vyskytující faktory během dočasného zaplavení území jsou (1) zaplavení lesů a mokřadů; (2) změna říčních hydrologických parametrů; (3) změna kvality vody a (4) narušení procesů rybí migrace. Všechny tyto procesy jsou navíc těžko předpověditelné (Fedorov et al., 2016).

Na území České republiky je riziko retence vody zřejmě nejvíce spojeno s katastrofickou událostí ochranné přehrady Desná 18. září roku 1916, při níž zemřelo celkem 67 lidí a kdy byly způsobeny škody za téměř devět a půl milionů v té době rakouských korun. U paty 55 m široká, u koruny 5,5 m široká, sypaná hráz s korunou o délce 172 m a výšce 17,5 m měla zadržovat celkem 400 000 m³ vody na území 8,4 ha. Kolaudace přehradě proběhla v listopadu roku 1915, načež deset měsíců byla schopna sypaná hráz objem zadržovat až do dne protržení, kdy maximální objem nádrže dosahoval zhruba 290 000 m³. Příčinou protržení sypané hráze byl dlouhodobý průsak skrze těleso hráze vlivem špatně navrženého těsnění (Protrzenaprehrada.cz, cit. 2019).

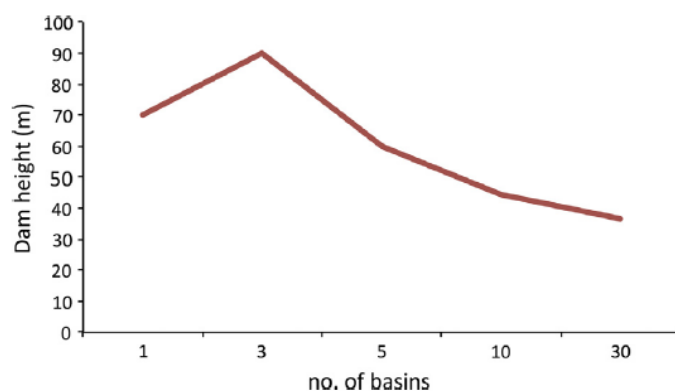
4.4 Výzkum využití malých vodních nádrží v protipovodňové ochraně

Výzkumné práce pojednávající o zapojení MVN do protipovodňové ochrany a zadržování vody jsou převážně soustředěny do dvou typů prostředí:

- městské a příměstské oblasti (např. Keßler et al., 2016; Liu et al., 2014; McPhillips, Walter, 2015; Nascimento et al., 1999);
- pramenné přírodní oblasti (např. Bellu et al., 2015; Taufmanová, Jeníček, 2011; Reinhardt et al., 2011; Vorogushyn et al., 2012).

Pro účely této diplomové práce je přínosnější rozbor zapojení MVN v pramenných přírodních oblastech, avšak poznatky z výzkumů MVN v městských a příměstských oblastech rovněž poskytují souběžně aplikovatelné informace ohledně rizik, umístění či zanášení nádrží pro MVN v mimoměstské krajině.

Bellu et al. (2015) provedli výzkum na výstavbu sérii retenčních nádrží v povodí řeky Vez (SZ hranice Portugalska). Celková plocha studovaného povodí činila 263 km² v hornatém území na nepropustných krystalických horninách s výškovým rozdílem 30 – 1400 m n. m a průměrným sklonem svahů 28%. Průměrný roční úhrn srážek na povodí je 2 375 mm. Povrch tvořila ze 40% polopřírodní vegetace; 34,5% lesy; 23% zemědělská půda; 2,5% zastavěné plochy. Použitý kulminační průtok v hydromodelování přesahoval až 550 m³/s. Plnohodnotná protipovodňová ochrana by za takových podmínek zahrnovala jednu přehradu o výšce hráze 70 m (klasifikace HFRB dle Scholze, viz kapitola 4.1), nebo 30 nádrží o výšce hráze 36 m (SFRW), což představovalo stále velké číslo navzdory provedení prostorové analýzy pro jejich optimální umístění (obrázek 4.3). Nutnost výstavby takto vysokých hrází na studovaném území je predisponována krajinným pokryvem v podobě skalnatého povrchu s příkrými svahy, jež značně ovlivňují vysokou intenzitu srážko-odtokového režimu. V takovém případě se výstavba retenčních nádrží nevyplácí z hlediska nákladů na výstavbu a řešení konfliktů mezi vlastníky pozemků. Autoři ve výsledku výzkumu pouze uvádějí eventuální protipovodňovou ochranu v podobě rozsáhlého programu aforestace na území za účelem zvýšení celkové evapotranspirace.



Obrázek 4.3: Graf průměrné výšky hráze (osa Y) oproti počtu retenčních nádrží v povodí (osa X). (zdroj: Bellu et al. 2015)

Reinhardt et al. (2011) provedli srážko-odtokové modelování pro stoleté povodně v pramenné oblasti středně velkého povodí Flájského potoka v Krušných horách při zapojení malých decentralizovaných akumulčních nádrží. Povodí o rozloze 315 km² je odvodňováno Flájským potokem s průměrným ročním odtokem 5,9 m³/s v závěrovém profilu umístěném v Pockau. Průměrný roční povodňový odtok činí 67,3 m³/s,

maximální odtok nastal v srpnu roku 2002 s 315 m³/s. Nadmořská výška povodí dosahuje rozmezí mezi 398 a 921 m n. m. s mírně ukloněnými svahy a představuje hustě zalesněnou oblast z až dvou třetin, kde přibližně třetina představuje zemědělskou oblast a kde pouhé 3% jsou zastavěné. Geologickou kompozici zastupují metamorfní horniny pokryté vrstvou sedimentů periglaciálního původu. Při zapojení 32 akumulacích nádrží a aforestaci niv ukázaly výsledky hydrologického modelování největší efektivní snížení odtoku v závěrovém profilu během stoleté povodně (až 65% snížení odtoku). Autoři zdůrazňují vhodnost výstavby decentralizovaných nádrží jakožto doplněk k jednotným vodním nádržím, jelikož pomáhají snížit i zpomalit povodňovou vlnu na lokální úrovni. Zalesňování pomáhá navíc snížit kulminační průtok na supralokální úrovni, avšak neefektivněji pouze během počáteční fáze povodňové události (Boelscher et al., 2010 in Reinhardt et al., 2011).

Malé vodní nádrže nachází také populární uplatnění v zastavěných oblastech, jež mají v porovnání s pramennými oblastmi vodních toků signifikantně rozdílné vlastnosti. Výzkumné aktivity vlivu MVN na odtok v městských oblastech však poskytují informace o rozdílné funkci MVN v odlišných podmínkách.

Volbou ekonomicky-ekologických optimálních technických vodohospodářských opatření za účelem snížení odtoku včetně znečišťujících látek v městské oblasti poblíž Indianapolis v USA se zabýval Liu et al. (2014). Do dvanácti technických opatření s vhodným umístěním v rámci povodí zahrnul také retenční nádrže, detenční nádrže, mokřady, mokřadní kanály a bioretenční nádrže. Opatření byla zahrnuta do povodí podle vytvořeného rámce pro simulaci nejlepších hospodářských praktik (best management practices) a nízkých dopadů rozvoje (low development impacts). Vstupní data srážkových úhrnů, průtoků, hydrologických půdních typů, krajinného pokryvu a odhadu zatížení znečištěním byly zahrnuty do modelu L-THIA-LID 2.1 pro celkem 16 scénářů. Scénář S0 obsahoval pouze retenční nádrže, S1 – S13 zahrnovaly individuální zapojení jednotlivých technických opatření a scénáře S14 a S15 pak představovaly zapojení všech opatření v rozdílném poměru. Výsledky evidentně prokázaly neefektivnější snížení průtoku i polutantů při zapojení všech technických opatření dohromady, což by ale představovalo až 74x větší celkové ekonomické náklady za 20 let, než zapojení pouze detenčních nádrží nebo mokřadů a 25x větší náklady, než provoz retenčních nádrží. Mezi scénáři představujícími individuální zapojení MVN se ukázalo, že

detenční nádrže mají nejvyšší procentuální snížení odtoku oproti ostatním typům nádrží nebo mokřadních ploch. Co se však týče velikosti procentuálního snížení polutantů, nejefektivnější se prokázaly být retenční nádrže. Vypočtené průměrné roční náklady za snížení průtoku i polutantů jsou pro retenční nádrže navíc nejnižší ze všech typů MVN, včetně mokřadů (Liu et al., 2014). Ze všech technických opatření byla v maximálním snížení odtoku překvapivě nejefektivnější porózní dlažba, která se však na našem zájmovém území pramenných oblastí nevyskytuje.

Na území Česka se výzkumem zapojení malých vodních nádrží a jejich vlivu na průtoky bleskových povodní v povodí Rolavy se zabývali Taufmannová a Jeníček (2011). V celistvém hydrologickém modelu HEC-HMS provedli simulaci srážkových scénářů s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let použitím metody Clarkova jednotkového hydrogramu. Model byl přesněji kalibrován a validován na dvou srážko-odtokových událostech během zapojení čtyř suchých poldrů na povodí i bez jejich zapojení. Užitím totální geodetické stanice byl změřen celkový objem všech poldrů, jež činil 856 640 m³, které dohromady odvodňovaly povodí o velikosti 43,1 km². Poldry byly v modelu užity pouze jako nekontrolované nádrže s nekonstantním nasycením, nesloužily tedy k účelu hydraulického modelování s užitím transformační funkce pro zmírnění povodňové vlny. Výsledky ukázaly snížení kulminačních průtoků se zvyšující se srážkovou extremitou při zapojení všech poldrů až do doby opakování N100 (tabulka 4.3). Vyšší srážky by pravděpodobně vygenerovaly takový vodní stav, proti němuž by bylo výsledné zapojení všech poldrů v povodí zanedbatelné. Nejefektivnější se ukázal poldr P4 v horní části povodí na soutoku řeky Rolavy a Slatinného potoka, který má mimo jiné největší zádržný prostor (Taufmannová, Jeníček 2011).

Tabulka 4.3: Parametry suchých poldrů a výsledky simulace srážko-odtokové události (zdroj dat: Taufmannová, Jeníček, 2011).

Poldr	Objem (m ³)	Území (m ²)	Odvodňované území (km ²)			
P1	185 434	67 869	11,1			
P2	217 971	93 530	18,3			
P3	182 236	56 731	1,8			
P4	271 002	89 323	11,9			

Zapojení suchých poldrů	Indikátor	N10	N20	N50	N100
Ne	Q _k (m ³ /s)	22,4	29,7	45,1	62,8
Ano	Q _k (m ³ /s)	19,5	24,9	37,1	50,8
Změna maximálního odtoku při zapojení a nezapojení suchých poldrů	Pokles Q _k (%)	12,9	16,2	17,7	19,1

5. UAV technologie

5.1 Definice

Označení UAV (z angl. *Unmanned Aerial Vehicle*) se v zahraniční terminologii používá pro kategorii dálkově řízených i neřízených letadel včetně modelů. Česká terminologie používá označení *bezpilotní letadla*, která jsou definována jako „všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg.“ (ÚCL, 2017). Z definice úřadu pro civilní letectví vyplývá jednak vyčlenění kategorie modelů letadel a jednak nezahrnutí neřízených (autonomních) letadel. Slovo „bezpilotní“ v tomto kontextu znamená nikoliv „nepilotovaným“, tedy bez pilota, ale *bez pilota na palubě*. Bezpilotní letadlo se od modelu letadla liší z definice modelu letadla: „Letadlo (...) používané pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo (...).“ (ÚCL, 2017). V definici je dále model letadla členěn do dvou typů: *volný model* – dálkové řízení zahrnuje pouze ukončení letu; *řízený model* – řízen pilotem po celou dobu letu skrze vysílač při udržení vizuálního dohledu (ÚCL, 2017).

Souběžně používaným termínem je tzv. *bezpilotní systém*, což je ekvivalentním označením pro anglický termín *Unmanned Aircraft System (UAS)*. Bezpilotní systém je „systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat.“ (ÚCL, 2017).

5.2 Přínosy

UAV technologie a metody představují dle McCabe et al. (2017) šest klíčových výhod:

1. sběr geodat o velmi vysokém rozlišení v řádovosti 1-20 cm pixelové velikosti;
2. relativně rychlé pořízení dat v cenové dostupnosti pro individuálního výzkumníka;
3. možnost nosit více sensorů (aktivních nebo pasivních) napříč elektromagnetickým spektrem;
4. použitelnost pro kalibraci a validaci satelitních systémů;
5. doplněk, rozšíření, nebo v některých případech i nahrazení pozemních měření (obzvláště v hůře-dostupných oblastech);
6. užití jako nástroje pro převod měřítka mezi satelitními a terénními daty.

Obecně někteří autoři zmiňují metodu UAV jako ekonomicky relativně efektivní techniku pro sběr prostorových dat o vysokém rozlišení v porovnání s jinak dostupnými komerčními produkty (Koci et al. 2017; Langhammer et al., 2018). Technika, jež činí UAV metod více efektivní při zpracovávání prostorových dat a umožňuje tvorbu digitálního povrchu terénu, zahrnuje metodu SfM (viz kapitola 7.1). Dohromady tedy bezpilotní systémy v kombinaci s postupy počítačového modelování tvoří flexibilní metodu pro sběr a zpracování dat pro tvorbu 3D modelu.

5.3 Legislativní a technická omezení

V České republice je používání bezpilotních systémů upraveno leteckým předpisem L2, konkrétně v pravidlech létání v Doplněku X tohoto předpisu, které spravuje Úřad pro civilní letectví (ÚCL). Z něj vyplývají omezení v následujících kategoriích:

- **zásady bezpečnosti:** let nesmí ohrozit bezpečné létání ostatních objektů ve vzdušném prostoru, osoby, majetek a životní prostředí;

- **zásady pro pilota:** dodržování vizuálního kontaktu s UAV a vyhodnocování dohlednosti pilotem, omezení pohybu pilota při používání UAV, evidence pilota či letadla na ÚCL v případě nerekreačního použití nebo velké hmotnosti UAV;
- **odpovědnost:** použití UAV pouze za stanoveným účelem, umožnění kontroly provozu ÚCL, záznam letu pilotem;
- **letecký prostor a ochranná pásma:** omezení letu ve vyhrazených leteckých prostorech (viz ÚCL, 2017)
- **hmotnost a účel použití:** změna účelu použití ve vztahu k hmotnosti UAV, změna bezpečných vzdáleností v závislosti na hmotnosti UAV (viz ÚCL, 2017);
- **meteorologická omezení:** minimální stanovení vertikální (300 m) a horizontální (1500 m) vzdálenosti od oblaků.

Mimo omezení skrze předpisy je třeba počítat i s technickými omezeními, konkrétně u tvorby snímků. Podstatným omezením metod UAV jsou v tomto případě maximální délka letu, maximální zatížení nosiče a rozlišení kamery k nosiči připevněné (Miřijovský, Langhammer, 2015). Dalším příkladem omezení je ovládání nad určitou mezí rychlosti větru, nebo vnímání leteckých nosičů jako ohrožení či potenciální potravu z pohledu dravé létající zvěře. Potenciální paradoxní hrozba pro vývoj UAV metod má zárodek ve spíše technologické, než ve vědecké perspektivě vývoje UAV metod, jelikož technologický vývoj v dnešní době předbíhá vývoj vědecký. Vědecké poznatky jsou vyžadovány vzhledem k přísnějšímu přístupu ve vývoji přesných a robustních výstupních produktů, zatímco technologický přístup může přinášet produkty bez důkladného pochopení přesnosti, kalibrace a celkového výkonu sensorů (McCabe et al., 2017).

5.4 Příklady užití v hydrologických studiích

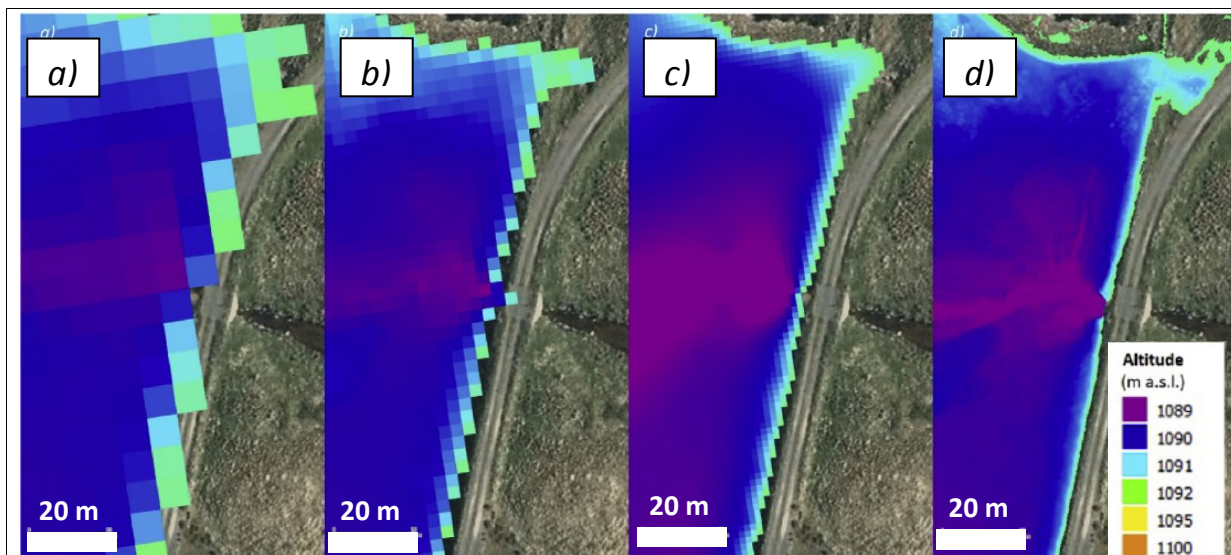
UAV technologie nacházejí stále se rozšiřující oblasti využití v geovědách a s ohledem na téma práce konkrétně v hydrologii a fluviální geomorfologii. Měření pomocí bezpilotních systémů pomáhá mapovat např. hloubku sněhu, povodně a předpokládanou evapotranspiraci na úrovni přesnosti v řádech menších než je jeden metr (McCabe et al., 2017). Mezi typické oblasti aplikace metod UAV v hydrologicky zaměřených výzkumech na území ČR patří zejména sledování dynamiky fluviálních procesů (Miřijovský, Langhammer, 2015), analýza následků povodní (Langhammer, Vacková, 2018),

vytváření přesných modelů pro hydrodynamické modelování (Langhammer et al., 2017), stejně jako např. měření hloubky sněhu a zjišťování Leaf Area Indexu (Lendzioch, et al., 2019).

V závislosti na zvoleném zdroji dat se následně odráží i přesnost rekonstruovaného 3D modelu snímaného území. V praxi lze pro sběr geograficky přesných prostorových dat za účelem tvorby digitálního modelu terénu (DMT) využít typicky např. geodetických metod, topografických podkladů, laserového skenování (metoda LiDAR) nebo právě metod UAV. Stěžejním přínosem metod UAV pro hydrologický výzkum je schopnost vytvoření bezešvého trojdimenzionálního modelu s velmi vysokým rozlišením, jenž umožňuje detailní zobrazení složitých segmentů koryt vodních toků přínosných pro analýzu odtokových a fluvialních procesů (Langhammer et al., 2017). Porovnáním výše zmíněných datových zdrojů včetně historických údajů o objemu zaniklé vodní nádrže Rokytka se zabýval Langhammer et al. (2018). Studie dochází k následujícím závěrům, ohledně přesnosti metody UAV, které představují zároveň metodická východiska pro výzkum v rámci této práce:

- z dat pořízených metodou UAV lze vytvořit DMT s průměrnou hustotou bodového mračka 547,6 bodů/m² oproti DMR4G a DMR5G s průměrnou hustotou 1 – 2 body/m² a geodetickému měření s průměrnou hustotou 0,00048 bodů/m²;
- skrze postupy pro tvorbu 3D modelu z metod UAV lze vytvořit bezešvý DMT ve velmi vysokém rozlišení (5 cm), čímž se v modelu projeví i jemná struktura terénu nezbytná pro detailní analýzu odtoku, fluvialních procesů a pro věrohodné výpočty retenčního objemu při nízkých hladinách zaplavení i při plném zaplavení až po okraj vodní nádrže;
- DMT o velmi vysokém rozlišení získaný skrze metody UAV poskytuje nízkou úroveň generalizace v centrální zóně nádrže, kde se nachází úzká a mělká koryta a která je klíčová pro zhotovení batymetrických modelů s přesným určením objemových vlastností nádrže (Langhammer, 2018).

Porovnatelnost rozlišení DMT získaných z různých datových zdrojů lze vidět na obrázku 5.1 níže.



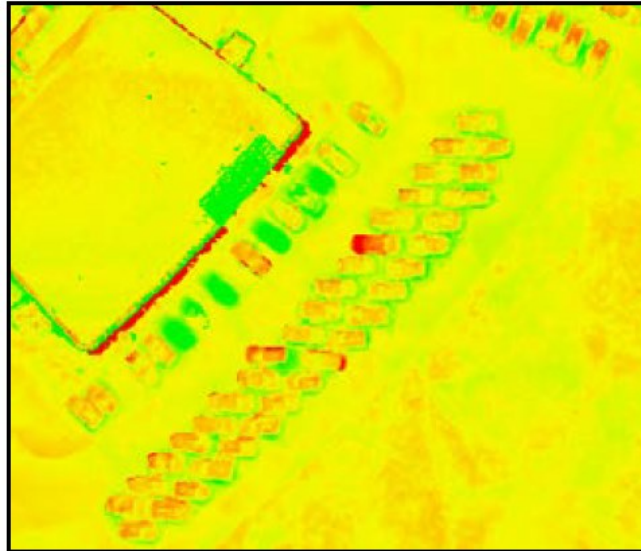
Obrázek 5.1: zobrazení efektu různého rozlišení digitálních elevačních modelů z různých datových zdrojů při koruně hráze nádrže Rokytka: a) DMR4G (5x5 m); b) DMR5G (2x2 m); c) totální geodetická stanice (1x1 m); d) snímkování UAV (0,05x0,05 m). (Zdroj: Langhammer et al., 2018).

5.5 Hodnocení přesnosti modelů vytvořených skrze metody UAV

Přístupy k metodě UAV snímkování a fotogrammetrii se liší od uživatele k uživateli. Je zřejmé, že rozpětí použitých technologií i postupů je širokosáhlé vzhledem k vybavení, zaměření, nebo lokalitě daného výzkumného problému. Kombinace např. volby nastavení a typu kamery; nastavení parametrů bezpilotního nosiče; charakteru a velikosti snímaného území; umístění počtu pozemních kontrolních bodů; volby softwaru a softwarových postupů – ovlivňují výslednou přesnost tvorby digitální podoby modelu. Vlivy výše zmíněných faktorů na přesnost modelů z různých výzkumů jsou podrobněji rozebírány v této kapitole.

Analýzu přesnosti DEM relativně malé plochy vytvořeného skrze UAV fotogrammetrickou metodu lze ilustrovat na příkladu snímkování zastavěného území o velikosti 500x500 m² ve dvou letových hladinách: 70 m a 140 m (viz Santise et al., 2013). Polohopisná i výškopisná kontrola vytvořeného DMP proběhla vůči třiceti kontrolním pozemním bodům (GCP) a celkem 3 000 elevačním bodům zaměřenými GPS na pozemní úrovni. Při použití 28 místo 9 GCP pro letovou výšku 140 m se zpřesnil pouze elevační údaj, nikoliv polohový. Celková hodnota RMSE pro všechny kontrolní body byla 5 cm, přičemž betonové povrchy vykazovaly menší chybu vůči travnatým povrchům. DMP vytvořené z UAV metody v letových výškách 140 m a 70 m měly v porovnání minimální

rozdíly v přesnosti, nicméně model povrchu vytvořený z nižší letové hladiny ukazoval změnu přesnosti ve výšce až o 20 cm při přeletu nad vysokými budovami. Nejvyšší výškopisné rozdíly mezi oběma modely byly zaznamenány na ostrých hranách budov a jiných objektů s náhlou změnou elevace a sklonu (obr. 5.2; Santise et al., 2013).



Obrázek 5.2: detail rozdílů mezi modely DMP vytvořeného z letové výšky 70 m a 140 m o rozlišení 20 cm; snímek znázorňuje budovu a parkoviště se zaparkovanými vozidly; červená – nejvyšší rozdíly, zelená – nejnižší rozdíly; červeně zbarvený povrch jednoho z automobilů představuje změnu elevace při odjezdu tohoto automobilu z parkoviště v intervalu mezi dvěma snímkováními (zdroj: Santise et al., 2013)

Testování přesnosti ortomozaiky zpracované ze snímků území nesouvislé městské zástavby o velikosti 2 ha za pomoci bezpilotního letadla v letové hladině 90 m nad povrchem provedli Barry a Coakley (2013). Na území bylo rozmístěno celkem 45 GCP zaměřených GPS. Přesnost XYZ souřadnic mezi fotogrammetrickým modelem UAV a GPS-zaměřenými kontrolními body dosahovala horizontální odchylky 4,1 cm a 6,8 cm vertikální odchylky. Na základě těchto zjištění autoři vyzdvihují efektivitu UAV metod nad GPS, kdy UAV fotogrammetrické metody mohou v mnoha případech nahradit pozemní měření skrze GPS na větších územích (Barry, Coakley, 2013).

Přesnost DEM plochého polního území o rozloze 4,3 ha, vytvořeného ze snímků třech vysoko formátových kamer (SONY, Canon, UltraCam Falcon Prime) připevněných na více dronů zkoumal Passini a Weaver (2017). Letová hladina dronů se pohybovala okolo 122 m. Celé území bylo pokryto celkem šesti snímky s 60 a 30% překryvem. Bylo vymezeno

celkem 15 GCP, nad nimiž proběhlo vlíčování individuálně vytvořených DEM s výslednou průměrnou odchylkou 2-3 cm. Nejlepších výsledků dosáhl DEM zpracovaný ze snímků kalibrované kamery UltraCam s horizontální odchylkou 0,9 cm a vertikální odchylkou 2,9 cm (tabulka 5.1). Autor upozorňuje na UAV standardně vybavených komerčními kamerami, jejichž pixelové rozlišení, optika, a materiály mohou dohromady snížit radiometrickou kvalitu i kvalitu geometrie obrazu (Passini, Weaver, 2017).

Tabulka 5.1: srovnání výsledků přesnosti DEM vytvořených fotogrammetricky ze snímků tří použitých fotoaparátů (zdroj dat: Passini, Weaver, 2017).

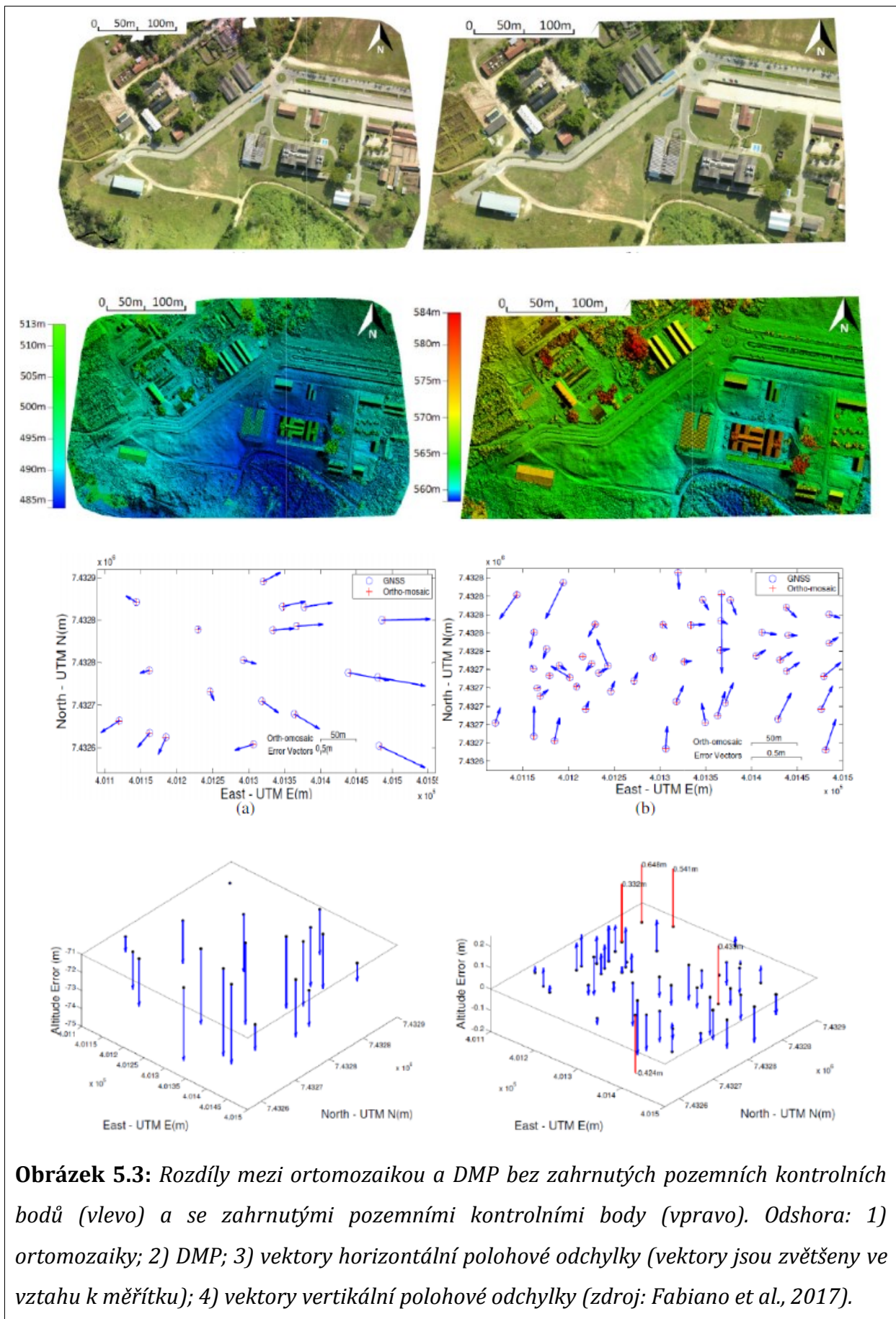
	Bez kalibrace fotoaparátu				Kalibrovaný fotoaparát			
	σ	RMSE x	RMSE y	RMSE z	σ	RMSE x	RMSE y	RMSE z
UltraCam	0,96 μm	1 cm	1 cm	3,5 cm	0,89 μm	0,9 cm	0,9 cm	2,9 cm
SONY	4,1 μm	1,5 cm	1 cm	8 cm	3,7 μm	1 cm	0,9 cm	3,2 cm
Canon	4,5 μm	5,3 cm	5,1 cm	11,1 cm	3,8 μm	1,2 cm	2,1 cm	5,1 cm

Přesnost DEM z UAV metody aplikované v hůře dostupné lokalitě pokryté vegetací zkoumali Akturk a Altunel (2017). Na území zarostlým dřevinami, křovinami a lučinami s proměnlivou topografií o rozloze 1,49 ha a změnou nadm. výšky mezi 733,8-755,3 m n. m. provedli snímkování dronem ve výšce CCA 50 m. Celkem bylo na území použito 7 GPS-zaměřených GCP včetně ostatních náhodných bodů (vertikální i horizontální poloha). Zpracováním snímků byly vytvořeny celkem dva DEM o rozlišení buňky 9,85 cm. Testování přesnosti proběhlo mezi DEM vytvořeným včetně zahrnutých kontrolních pozemních bodů (DEM GCP) a DEM bez zahrnutých pozemních bodů (DEM) vůči bodům zaměřeným RTK-GPS a vůči SRTM DEM o rozlišení 30 m. Pro všechny modely bylo vybráno celkem 112 reprezentativních výškových bodů. Výškopisný rozdíl bodů pro každý model byl vypočten pomocí RMSE (tabulka 5.2). Z hodnot tabulky je patrné, že při zahrnutí kontrolních pozemních bodů do procesu tvorby DEM se výškopisná chyba zmenšila o 6 cm, což nemusí znamenat velkou hodnotu, nicméně může znamenat mnoho při implementaci GCP bodů do tvorby modelů vyžadovaných do projektů náročných na vysokou přesnost modelů (Akturk, Altunel, 2017).

Tabulka 5.2: maximální a minimální výškopisné rozdíly včetně RMSE mezi modely a pozemně zaměřenými body RTK-GPS (zdroj dat: Akturk, Altunel, 2017).

	Max ΔH	Min ΔH	RMSE
RTK-GPS minus DEM GCP	1,46 m	0,5 m	0,51 m
RTK-GPS minus DEM	1,55 m	0,6 m	0,57 m
SRTM DEM minus DEM GCP	9,7 m	0,5 m	6,88 m

Fabiano et al. (2017) zhotovili fotogrammetrickými UAV metodami digitální model povrchu území s nesouvislou zástavbou o velikosti 15 ha. Postup tvorby zahrnoval let dronu vybaveným navigačním systémem v průměrné výšce 50 m, snímkování území s nízko-formátovou komerční kamerou a následným zpracováním s překryvem snímků 60% v latitudálním a 80% v longitudálním směru. Pro zlepšení planimetrické i altimetrické přesnosti zaměřili autoři v terénu 40 bodů pomocí GNSS GPS, jež byly doplněny polohovými informacemi dvou geodetických bodů národní sítě vyskytujících se na území. Do procesu zarovnání snímků v softwarovém prostředí bylo nejdříve zahrnuto 7 GCP, následně byly snímky zarovnány bez GCP a v obou případech byly vytvořeny DMP i ortmozaika. Výsledky prokázaly, že oba DMP věrohodně zachycují změny v průběhu terénu, avšak polohy vertikální i horizontální složky vůči kontrolním bodům se mezi oběma modely značně odlišují (obrázek 5.3). Nejvýrazněji se vůči GPS-zaměřeným bodům projevila výškopisná odchylka modelu bez zahrnutých GCP s hodnotou RMSE rovné 73,9 m v porovnání s modelem se zahrnutými GCP s hodnotou RMSE = 0,19 m. Horizontální a vertikální odchylky dosahovaly do 0,31 m a do 0,27 m příslušně pro model se zahrnutými GCP, horizontální a vertikální odchylky pro model bez zahrnutých GCP dosahovaly maximálních příslušných hodnot 3,37 m a 73,1 m (Fabiano et al. 2017).



Vyhodnocení horizontální i vertikální přesnosti celkem 1321 digitálních modelů povrchu třech ledovců ve Švýcarských Alpách během podzimní, zimní a letní sezóny provedli Gindraux et al., (2016). Tisíce pozemních kontrolních bodů zaměřených GPS bylo zkoumáno z hlediska jejich ideálního počtu nezbytného pro vytvoření co nejpřesnějšího DMP. Se zvyšujícím se počtem kontrolních bodů asymptoticky roste horizontální i vertikální přesnost až do určité optimální hustoty bodů. Po aplikaci této optimální hustoty bodů klesla polohová odchylka modelu vůči GPS bodům ve vertikální složce na hodnoty v rozpětí 10-25 cm, hodnota horizontální složky na 3-9 cm. Lokální přesnost klesá se vzdáleností od kontrolních bodů v průměru 9 cm/100 m. Negativní vliv na přesnost modelu má také textura povrchu čerstvě napadlého sněhu (Gindraux et al., 2016).

III. METODICKÁ ČÁST

6. Popis užitých dat

6.1 UAV letecké snímky

Základní a jediná vstupní data pro trojdimenzionální modelování tvoří snímky pořízené fotoaparátem DJI Zenmuse X5, model FC550, připevněném pomocí stabilizovaného tříosého závěsu (gimbalu) na bezpilotní platformě DJI Inspire 1 Pro (obrázek 6.1). Fotografie o rozlišení 4608x3456 pixelů byly snímány z průměrné výšky 95,5 m s konstantní rychlostí a intervalem sepnutí spínače fotoaparátu pět sekund tak, aby zajistily alespoň 70% překryv snímků v podélném i příčném směru. Pro pět plavebních nádrží v povodí Roklanského potoka bylo pořízeno celkem 1458 snímků.

Bezpilotní nosič je vybavený GPS systémem, který přiřazuje do metadat zaznamenaných fotografií zeměpisné i výškové souřadnice do jejich centrálního bodu, tedy horizontální polohy ohniska fotoaparátu. Vzájemná kompozice sousedních snímků vykazuje překryv za účelem identifikace společných bodů a následné možnosti tvorby uceleného 3D digitálního modelu vytvořeného technikou tzv. *structure from motion* (volný překlad *struktura z pohybu*). Tato technika je podrobněji popsána v kapitole 7.1.



Obrázek 6.1: Vybavení bezpilotních systémů včetně fotoaparátu (Foto: Jakub Langhammer).

6.2 Konvenční výškopisná data

Pro porovnání výškové přesnosti DEM vytvořeného zpracováním UAV leteckých snímků sloužila výškopisná data ČÚZK v podobě DMR5G, který reprezentuje terén bez pokryvu vegetací či jinými objekty skrze diskrétní bodové mračno v nepravidelné trojúhelníkové síti, a výškové bodové pole (VBP) reprezentující referenční body pro přesnou lokalizaci geoinformací ve Výškovém systému Baltském – po vyrovnání (Bpv).

Sběr dat pro tvorbu DMR5G zahrnuje letecké laserové skenování systémem LiteMapper 6 800 a s laserovým skenerem RIEGL LMS – Q680 se zabudovaným GPS pro určování polohy skeneru. Nosičem je speciální letoun letící v letové hladině 1 200 m nebo 1 400 m nad průměrnou rovinou terénu. Mračna bodů reprezentují terén bez pokryvu. DEM byl z DMP získán nejdříve skrze automatickou robustní filtraci v programu SCOP++ ver. 5.4, následně proběhla manuální kontrola a přeřazení chybně klasifikovaných bodů v programu DT Master. Body jsou georeferencovány v souřadnicovém referenčním systému S-JTSK na elipsoidu EPSG:102067 a ve výškovém referenčním systému Bpv. Model je interpolován v oblastech neobsahující naměřená data. Z modelu jsou odstraněny nadbytečné body a upraveny výšky tak, aby byla maximální úprava výšky do 0,16 m. Absolutní střední chyba mírně generalizovaného modelu oproti geodeticky zaměřeným bodům je 0,18 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 0,3 m v terénech s hustou vegetací (Bělka et al., 2015).

V této práci byl použit rastr DMR5G povodí Roklanského potoka o prostorovém rozlišení buňky 8 m².

7. Metodika

7.1 Tvorba 3D texturovaného modelu povrchu nádrží

Pro tvorbu trojdimenzionálního digitálního modelu území byla použita fotogrammetrická technika *structure from motion* (SfM), skrze niž lze vytvořit trojdimenzionální digitální model objektu z dvojdimenzionální sekvence obrazů tohoto objektu. Technika zakládá na tvrzení, že strukturu objektu tvořenou ze čtyř bodů neležících v jedné rovině lze získat ze tří ortografických projekcí (Ullman, 1979). Tento teorém byl později upraven na možnost unikátní rekonstrukce obrazu pouze ze tří bodů a tří ortografických projekcí (Knill, Ramirez-Herran, 2007). Z těchto tvrzení stručně vyplývá, že pro tvorbu 3D modelu je potřeba nalezení třech prostorově-si odpovídajících

bodů na alespoň třech překrývajících se snímcích. Pro účely rozpoznání shodných objektů na více snímcích slouží systém tzv. *local scale-invariant features* (SIFT), který detekuje shodné body funkcemi neměnnými vůči škálování, afinní transformaci a částečně i vůči osvětlení (Lowe, 1999). Jinými slovy dochází k identifikaci shodných bodů na překrytých snímcích v nezávislosti na vzdálenosti ohniska od objektů a změně lineárního posunu bodů na těchto objektech. Tento přístup získávání prostorových informací skrze techniku SfM se liší v porovnání ke klasické stereofotogrammetrii, u které je prostorová vzdálenost bodů na rovině paralelní k rovině s fotografickým nosičem měřena v závislosti na konstantním měřítku snímku, tedy na vzdálenosti mezi nosičem a snímaným objektem. Dle Beni et al. (2018) jsou klíčovými faktory při používání SfM výška letu, naklonění kamery a překryv snímků, jež ve výsledku signifikantně ovlivní tvorbu DEM.

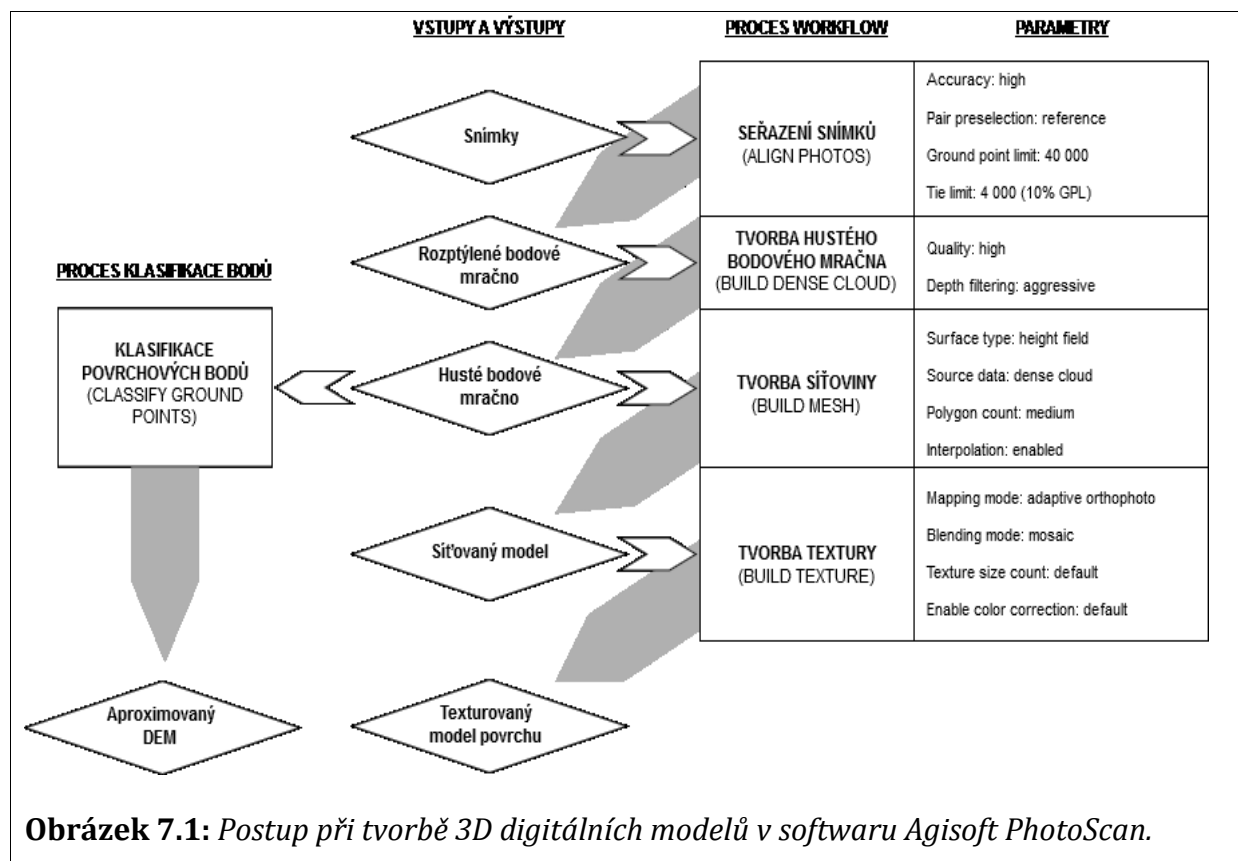
Jako prostředí pro zpracování velkého množství snímků plavebních nádrží byl použit fotogrammetrický software Agisoft PhotoScan Professional verze 1.2.0. Program umožňuje zpracování nestrukturovaného souboru 2D snímků do uceleného 3D digitálního modelu skrze nezbytné implicitně nebo manuálně určené údaje o poloze a překryvu těchto snímků. Výhodou softwaru je částečná automatizace procesu a rekonstrukce objektu v nezávislosti na pozici snímače, pokud je ovšem objekt viditelný na alespoň dvou snímcích (Agisoft LLC, 2016).

Softwarové výpočty probíhaly na PC s procesorem Intel Core i5-3210M CPU @ 2.50Ghz s nainstalovanou pamětí 8 GB a 64bitovým Windows XP operačním systémem. Toto nastavení odpovídá minimální konfiguraci uvedené v systémových požadavcích pro program Agisoft PhotoScan (viz Agisoft LLC, 2016).

Po nahrání snímků do programu dochází k jejich automatickému prostorovému uspořádání vůči sobě na základě přímého určení polohy nosiče fotoaparátu vybaveného GPS, které každému snímku přiřazuje polohové informace. Proces tvorby modelu je zahrnut v tzv. *workflow*, kde jsou zahrnuty pokyny nezbytné k vytvoření modelu. Proces vyžaduje vstupní data, jež jsou skrze *workflow* pokyny zpracovávány do výstupní podoby příslušné jednotlivým postupům procesu.

Postupné kroky při 3D rekonstrukci nádrží, využití při zpracování zahrnovaly následující operace: seřazení fotografií; tvorba hustého bodového mračka; tvorba digitálního elevačního modelu; tvorba síťoviny modelu (*mesh*); tvorba textury modelu.

Celý tento postup tvorby modelu včetně zvolených parametrů pro tuto práci je stručně zobrazen diagramem na obrázku 7.1. Pro každou nádrž byly snímky do programu nahrány samostatně a po skončení celého procesu došlo k jeho opakování při tvorbě následného modelu.



Parametry pro každý krok procesu *workflow* byly zvoleny s ohledem na rozlišení snímků, povahu modelovaného terénu, výstupních detailů modelu a výkonnosti hardwaru.

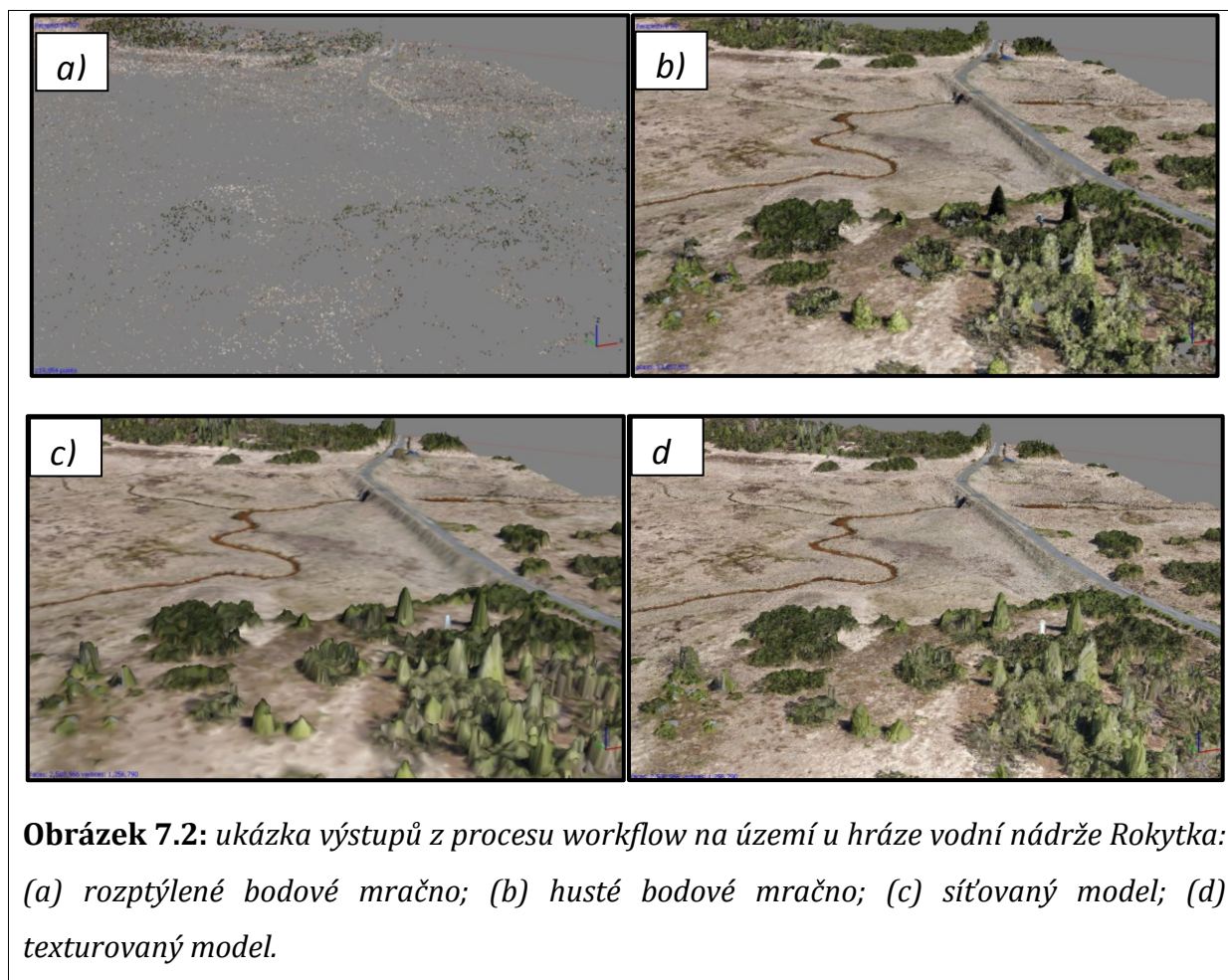
Seřazení snímků je základním krokem při tvorbě uceleného 3D modelu. S narůstajícím nastavením přesnosti seřazení (*accuracy*) roste přesnější odhad získání reálné pozice kamery. V tomto případě byl parametr nastavený na vysokou hodnotu (*high*), skrze niž algoritmus pracuje s originálními velikostmi fotografií.

Zásadní krok představuje tvorba hustého bodového mračna (*dense cloud*), které představuje základ 3D rekonstrukce dané krajinné struktury. Pro zpracování byl zvolený parametr vysoké kvality (*high quality*) pro přesnou tvorbu geometrie povrchu a dosažení co nejvyšší hustoty bodového mračna, který ale má zároveň velmi vysoké nároky na výpočetní výkon a dobu zpracování. Průměrná doba vytvoření bodového mračna pro jednu nádrž trvala přibližně 50 hodin. Algoritmus pro filtrování hloubky

(*depth filtering*) byl nastaven na agresivní (*aggressive*), čímž při tvorbě hustého bodového mračna dochází k odfiltrování okrajových bodů nacházejících se mimo model za použití nastavení vhodného pro letecké snímky území, jež neobsahují podstatné malé detaily (Agisoft LLC, 2016).

Dalším důležitým parametrem zohledňujícím povahu povrchu při tvorbě síťoviny (*mesh*) je nastavení zohlednění výšky bodového pole (*height field*) vhodného pro modelování planárních povrchů (Agisoft LLC, 2016). Pro tvorbu textury je směrodatný parametr režimu prolnutí (*blending mode*), v němž probíhá nastavení hodnot pixelů z více fotografií za účelem kombinace těchto hodnot ve tvorbě konečného vzhledu textury (Agisoft LLC, 2016).

Textura byla vygenerována užitím mozaikového algoritmu (*mosaic*), v němž je implementován přístup složený ze dvou kroků. Nejprve dochází k prolnutí nízkofrekvenční složky na překryvu mezi snímky, posléze je prolnta vysokofrekvenční složka nesoucí vysoké detaily, získaná pouze z jednoho snímku o vyšším rozlišení zájmové oblasti, přičemž pohled kamery je téměř kolmý k rovině rekonstruovaného povrchu vztaženého k centrálnímu bodu snímku (Agisoft LLC, 2016). Textura vygenerovaná ze síťoviny slouží k orientačním i identifikačním účelům v modelu pro pomocné rozlišení typu povrchu a následnou správnou generací DMT. Výsledná trojdimenzionální podoba všech nádrží je znázorněna v příloze 1.



7.2 Klasifikace bodového mračna a tvorba DEM

Model digitálního modelu povrchu (DMP) v oblasti nádrže, vytvořený v zalesněném prostředí, zahrnuje dvě skupiny vegetačního pokryvu. První skupina se nachází vně zádržného prostoru nádrží a nemá proto zásadní vliv na objemové výpočty. Druhá skupina ale zahrnuje vegetaci uvnitř zádržného prostoru nádrže, přičemž její ponechání v modelu terénu bez dalšího ošetření může výrazně ovlivnit objemové výpočty. Přímé využití DMP pro objemové výpočty není možné, protože povrch v daném případě reprezentuje nikoli reliéf, ale vegetaci. V postupu tvorby DMP jsou v bodovém mračnu body příslušné povrchu vegetačního krytu interpolovány společně s body povrchu terénu. Tím dále dochází k interpolaci vegetačního krytu i v oblasti pod stromovím, kde se nachází volný prostor kolem kmene stromu. V rámci vodní nádrže díky tomu vegetace zaujímá prostor na úkor volného zádržného prostoru.

Odstranění chyb v interpolovaném povrchu neodpovídajícímu skutečnosti je třeba řešit převedením digitálního modelu povrchu (DMP) na digitální model reliéfu (DMR, DEM).

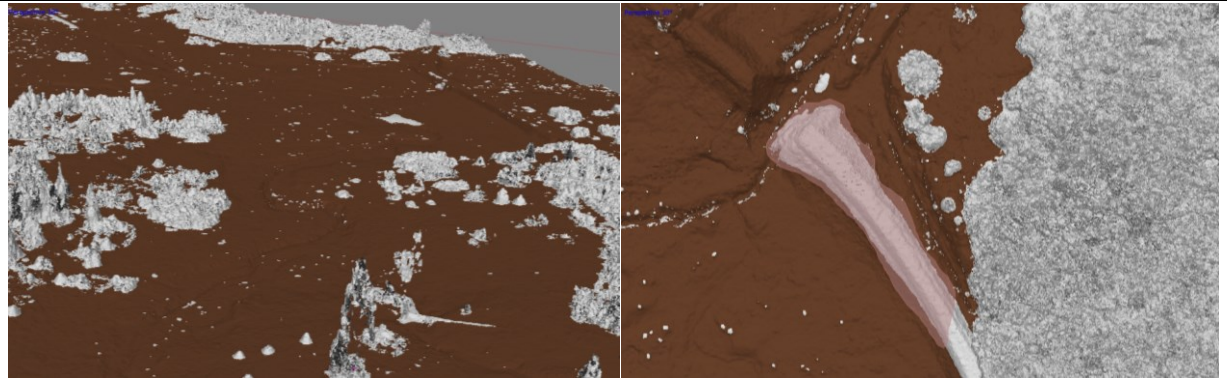
Cílem procesu je přitom zachování tvaru i věrných hodnot nadmořské výšky terénu nahrazujícího vegetační kryt.

V rámci řešení této práce byla k odstranění vegetace v zádržném prostoru nádrže použita kombinace automatizovaného i manuálního přístupu. Automatický proces převodu byl proveden algoritmem pro klasifikaci pozemních bodů (*classify ground points*) z bodového mračka v programu Agisoft PhotoScan. Vstupní parametry vyžadují nastavení maximálního úhlu (*max angle*), vzdálenosti (*max distance*) a velikosti buňky (*cell size*). Maximální úhel i vzdálenost určují limity pro všechny sousedící body během testování, kdy dochází k rozlišení propojení mezi skupinou pozemních bodů a následným zjišťovaným bodem. V případě nastavení maximálního úhlu je doporučeno použít vyšší hodnoty v případě, že se jedná o terén se strmými svahy. Velikost buňky by měla být volena s ohledem na největší plochu v modelu, jež neobsahuje žádné pozemní body (Agisoft LLC 2016). Výsledkem je dvoubarevně rozlišený povrch s klasifikací bodů spadajících do nastavených limitů a do bodů nad limitem. Takto dochází k vymezení pozemních bodů (*ground points*) a ostatních bodů (*any class*; obrázek 7.3). Malou podskupinu ostatních bodů pak tvoří tzv. hlukové body (*low points/noise*), jež klasifikační algoritmus vyhodnotil jako body nacházející se pod průměrným průběhem terénu.

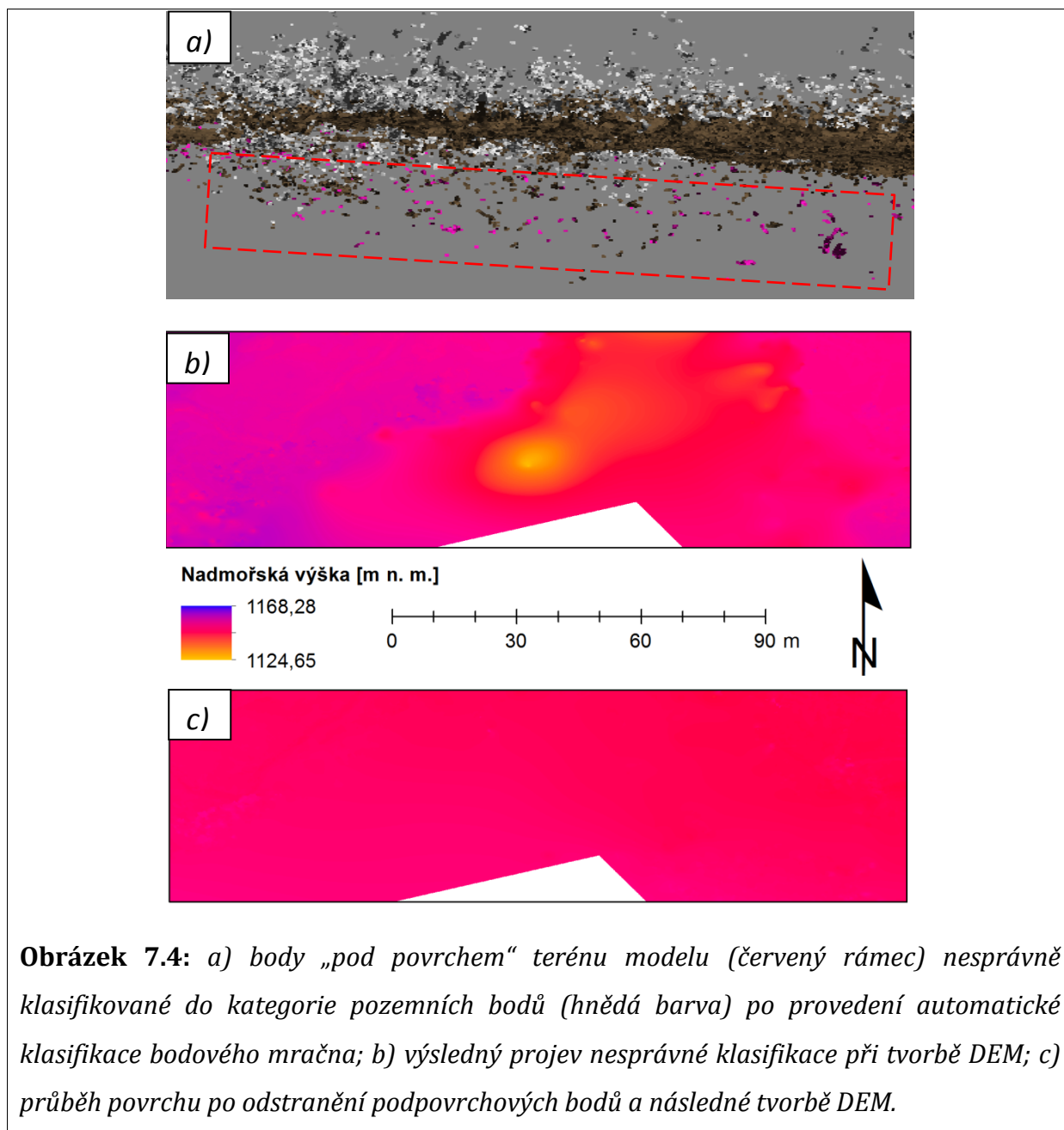
Vzhledem k různorodosti vegetačního pokryvu v každé nádrži, byly parametry klasifikace bodového mračka voleny individuálně s cílem identifikace co největšího rozsahu pozemních bodů. V případě, kdy automatická klasifikace nesprávně zařadila některé pozemní body do kategorie „*ostatní*“ či naopak, bylo použito manuálního označení bodů a jejich následné zařazení do správné kategorie. Správná identifikace pozemních bodů od ostatních bodů byla ověřena nad síťovaným modelem s viditelnou texturou.

Problém při klasifikaci hustého bodového mračka představovaly zejména body pod úrovní terénu modelu u všech nádrží. První fáze automatické klasifikace body označila správně do kategorie *low points*, avšak v mnoha případech se mezi těmito body nacházely shluky nesprávně klasifikovaných bodů náležících do kategorie pozemních bodů. Jelikož takto špatně klasifikované body tvořily početnou skupinu, vyžadovaly důkladnější kontrolu před klasifikací i tvorbou samotného DEM. V případě neodstranění shluků podpovrchových bodů a následné tvorbě DEM dojde k chybné interpolaci, která

ve výsledku vytváří lokální deprese, respektive propojuje místa s nepravdivou hodnotou minimální lokální nadmořské výšky (obrázek 7.4). Odstranění podpovrchových bodů proběhlo manuálně. Modely nádrží byly nejprve postupně natáčeny do pravoúhlého průmětu tak, aby byl zobrazen jejich bokorys. Tím bylo docíleno vizuálního oddělení podpovrchových bodů od povrchových bodů a bodů nad povrchem. Následovně proběhlo manuální označování a mazání bodů pod povrchem modelu nástrojem *free-form selection*.



Obrázek 7.3: identifikace pozemních bodů (hnědá) od bodů okolní vegetace (šedá). Vlevo: výsledek použití automatické klasifikace pozemních bodů. Vpravo: manuální označení a oprava špatně klasifikovaného objektu hráze nádrže



Obrázek 7.4: a) body „pod povrchem“ terénu modelu (červený rámeček) nesprávně klasifikované do kategorie pozemních bodů (hnědá barva) po provedení automatické klasifikace bodového mračka; b) výsledný projev nesprávné klasifikace při tvorbě DEM; c) průběh povrchu po odstranění podpovrchových bodů a následné tvorbě DEM.

Po klasifikaci a odstranění podpovrchových bodů je 3D model vhodný k tvorbě DEM. K tomu byl použit *workflow* proces v programu Agisoft PhotoScan určený k vytvoření DEM (*build DEM*) z bodového mračka užitím interpolačního algoritmu *natural neighbour*. Jako souřadnicový systém byl zvolen WGS84 (elipsoid EPSG:4326). Důležitým nastavením je volba bodové kategorie (*point class*), která obsahuje pouze pozemní body. Terénní model bylo vzápětí nutné exportovat pomocí funkce *export DEM* do formátu *.tiff* o velikosti buňky 7 cm. Zvolené rozlišení odpovídalo hojnému zastoupení elevačních bodů na velmi malých plochách v řádovosti centimetrů. Výsledný

DEM vzniklý fotogrammetrickým zpracováním UAV snímků je dále v této práci označován jako DronDEM a jeho následující analýza proběhla v programu ArcMap 10.4.

7.3 Vymezení hranice zádržného prostoru

Maximální napuštěný zádržný prostor nádrže si lze představit jako veškerý objem vody, jehož vrchní vertikální hranici tvoří vzduťatá volná hladina v rovině s korunou hráze v určité výšce nad dolní hranicí terénu. Horizontální prostor je vyhrazen mezi hrázi v místě odtoku z nádrže a místem, kde se vzduťatá hladina protíná s nevzduťatou hladinou přítékajícího toku, tedy délkou vzduťatí (Kratocvhl 1961). Průsečík roviny vzduťaté volné hladiny a okolního terénu si lze proto představit jako vrstevnici, jež tvoří obrys terénu kolem nádrže, prochází korunou hráze a půdorysně tak představuje nejvýše položenou množinu bodů omočeného obvodu při maximální vzduťaté hladině.

Postup pro získání této množiny bodů představoval vytvoření vrstevnic z DEM skrze funkci *Contour* při volbě intervalu vrstevnic 5 cm. Takový rozestup výškových izolinií tvoří v prostředí GIS velmi těsné shluky, z nichž je manuálně obtížné identifikovat nejvýše položenou vrstevnici, jež je průsečíkem maximální výšky volné hladiny v nádrži s okolním reliéfem. V takovém případě byl zvolen postup identifikace vrstevnice skrze atributovou tabulku, kdy byly označeny všechny izohypsy nacházející se na koruně hráze. Nejvýše položená vrstevnice spadající do takto vybrané skupiny, která procházela korunou hráze a zároveň tvořila obrys nádrže, byla zvolena jako reprezentativní. V některých případech na zkoumaném místě část, nebo celá hráz nádrže v případě Novohuťské a Studené nádrže fyzicky chyběla a byla proto dotvořena autorem na základě tvaru sbíhajících se vrstevnic v místě, kudy s nejvyšší pravděpodobností mohla chybějící část hráze vést.

Vygenerovaná izohypsa oddělující prostor nádrže od okolního terénu sloužila jako vektorový *shapefile* pro ořezání plochy rastru DEM užitím funkce *Clip (Data Management)*.

7.4 Filtrování nesprávně klasifikovaných bodů

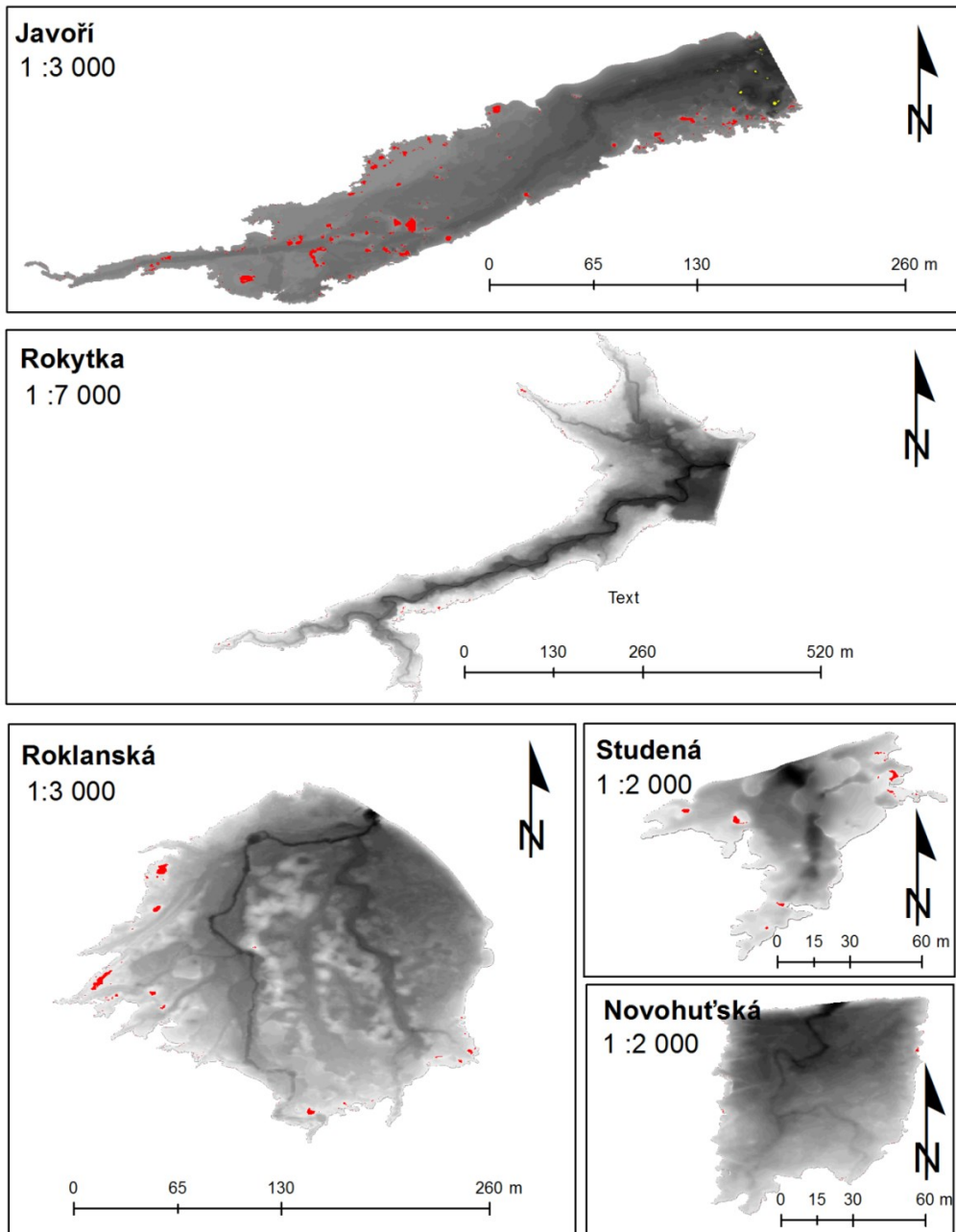
Vlivem klasifikace vysokého množství bodů v hustém bodovém mračnu se uvnitř zádržného prostoru vyskytují interpolované body terénu nad úrovní zádržného prostoru, resp. nad úrovní maximální vzduťaté hladiny. Jedná se o jednotlivé pozemní body, které se nacházely uvnitř mračna bodů klasifikovaných jako vegetace. Důvod

výskytu takovýchto bodů lze přičíst nastavení parametrů při procesu klasifikace bodů v rámci postupu *workflow*. Parametry zdaleka nevystihují různorodou povahu rozestupu a polohy bodů v rámci bodového mračka vůči sobě pro celé území modelu. V takovém případě je důsledkem univerzálního nastavení klasifikačního postupu výskyt špatně klasifikovaných bodů, jež neprošly následnou správnou identifikací při manuální klasifikaci bodového mračka. Příčinou je z části tedy i chyba autora během identifikace pozemních bodů.

Přítomnost špatně klasifikovaných bodů nad hranicí volné vzduté hladiny, byť i v malém množství, může v důsledku ovlivnit výpočty objemu nádrží, jelikož maximální nadmořská výška se při tvorbě objemových křivek bude nacházet nad nejvyšší kótou hráze. Výpočet objemu bude tedy i zahrnovat plochy, jež reprezentují prostor nad nejvyšší hranicí zádržného prostoru, čímž hodnota objemu bude ve výsledku nadhodnocená. Stejný případ platí i pro zastoupení špatně klasifikovaných bodů s minimální nadmořskou výškou, jež se můžou nacházet i pod úrovní terénu a ovlivňovat tak výpočty stejným způsobem (Obrázek 7.5).

Preventivní metoda použitá k odstranění nadhodnocení objemu zahrnuje identifikaci bodů nad vrstevnicí vymezující zádržný prostor pomocí reklasifikace rastru v programu ArcMap (funkce *Reclassify*). Plochy rastru DEM s nadmořskou výškou vyšší než je výška vrstevnice vymezující zádržný prostor, byla odstraněna pomocí funkcí *Greater Than* a *Set Null*. Plochy rastru DEM s nadmořskou výškou nižší, než je průměrná výška terénu, byly obtížněji identifikovatelné. Jejich stanovení tedy proběhlo na základě observace histogramů zastoupení absolutních četností nadmořských výšek pro všechny zádržné prostory nádrží (Příloha 2). Nadmořské výšky s minimálním zastoupením četností byly vyfiltrovány pomocí funkce *Less Than* a *Set Null*. Pro nejnižší přípustnou nadmořskou výšku použitou ve funkci *Less Than* byla zvolena taková hodnota, v níž se vyskytuje větší zastoupení četností a zároveň plocha těchto nadmořských výšek uvnitř zádržného prostoru je velmi malá. Z toho vyplývá, že hodnoty s nízkou nadmořskou výškou na relativně malých plochách reprezentují šum špatně klasifikovaných pozemních bodů.

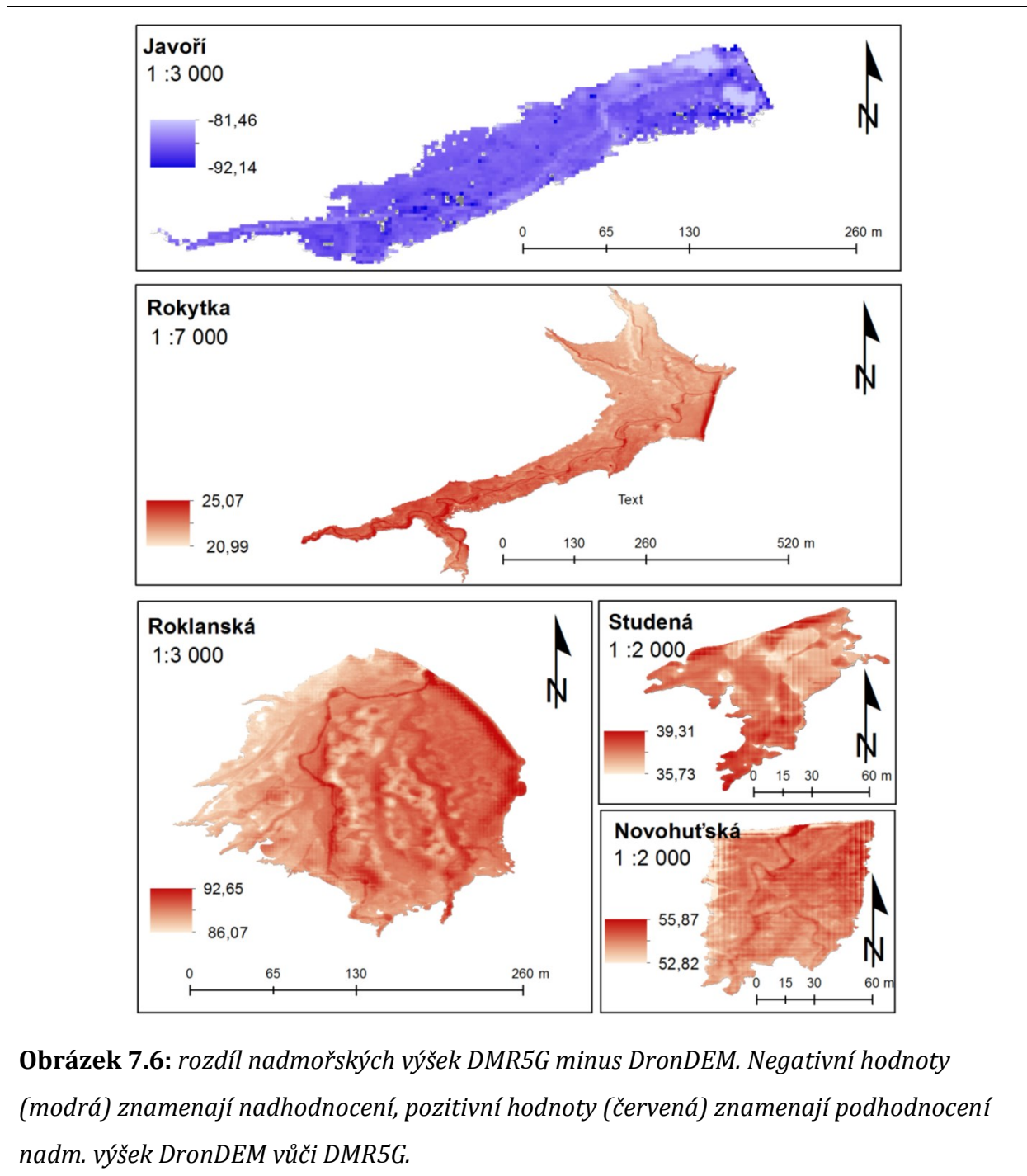
Nevýhodou předchozích přístupů je celkové odstranění těchto ploch, které nebudou zahrnuty do celkových výpočtů. Vzhledem k nevelkému prostorovému zastoupení takto špatně se vyskytujících poloh vzniklých v důsledku nesprávné klasifikace rastru, však vlivy na objemové výpočty budou minimální.



Obrázek 7.5: oblasti DronDEM s nadmořskou výškou větší (červeně) než je nadmořská výška vrstevnice vymezující zádržný prostor a oblasti se zastoupením četností v podprůměrně nízkých nadmořských výškách (žlutě).

7.5 Výškopisná korekce modelu

Porovnáním DronDEM a DMR5G, bylo zjištěno celkové podhodnocení nadmořských výšek všech nádrží DronDEM vzhledem k DMR5G s výjimkou Javoří nádrže, kde nadmořská výška DronDEM vůči DMR5G byla nadhodnocená (obrázek 7.6). Z tohoto důvodu bylo nutné identifikovat absolutní rozdíl nadmořských výšek mezi DMR5G a DronDEM pro všechny nádrže a určit variabilitu rozdílu nadmořských výšek na území jednotlivých nádrží.



Obrázek 7.6: rozdíl nadmořských výšek DMR5G minus DronDEM. Negativní hodnoty (modrá) znamenají nadhodnocení, pozitivní hodnoty (červená) znamenají podhodnocení nadm. výšek DronDEM vůči DMR5G.

Korekce modelu DronDEM byla provedena jednak vůči DMR5G a jednak vůči databázi výškového bodového pole (ČÚZK) nacházejícího se na území nádrží Javoří, Rokytka a Roklanská. V blízkém okolí Novohuťské a Studené nádrže se geodetické body nenachází, proto nebyl proveden výpočet rozdílu výšek mezi elevačními modely a bodovými poli na území těchto dvou nádrží (tabulka 7.2).

Doplňující porovnání DronDEM a DMR5G proběhlo metodou výběru sedmi reprezentativních výškových bodů pro každou nádrž zvláště v místech s relativně rovným terénem bez vegetačního pokryvu shodným pro oba elevační modely. Informace o nadmořské výšce byla vyexportována z obou elevačních modelů do všech těchto bodů v programu ArcMap pomocí funkce *Extract Values to Points*. Pro číselné vyjádření absolutního rozdílu reprezentativních výškových bodů DMR5G a DronDEM byl zvolen ukazatel *střední kvadratické chyby* (RMSE) vypočtené podle obecného vzorce:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}}$$

kde \hat{x}_i představuje výškové hodnoty reprezentativních bodů DMR5G, x_i jsou výškové body reprezentativních bodů DronDEM a n je celkový počet reprezentativních výškových bodů v rámci jedné nádrže. Variabilita rozdílných výškových hodnot jednotlivých nádrží byla vyjádřena hodnotami *směrodatné odchylky* σ (tabulka 7.3). V případě, kdy $\sigma \rightarrow 0$, pak absolutní rozdíly mezi nadmořskými výškami obou modelů jsou menší.

Rozpětí mezi maximální a minimální nadmořskou výškou pro každou nádrž je dalším potenciálním ukazatelem přesnosti DronDEM vůči DMR5G. Velké rozdíly vnitřního rozpětí nadmořských výšek mezi oběma modely by znamenalo zásadní nedostatky modelu DronDEM, kterých by mohlo být dosaženo během samotné tvorby 3D modelu nebo při klasifikaci bodového mračka. Tento ukazatel je proto základním i zásadním pro rychlou identifikaci chyb v tvorbě modelu (tabulka 7.1).

Tabulka 7.1: Rozpětí nadmořských výšek u modelu DMR5G i DronDEM pro všechny nádrže.

Nádrž	DMR5G		Rozdíl	DronDEM		Rozdíl	Absolutní rozdíl DMR5G - DronDEM
	H max	H min		H max	H min		
Javoří	1062	1052,41	9,59	1148,1	1140,78	7,32	2,27
Rokytká	1093,76	1089,21	4,55	1069,6	1066,26	3,34	1,21
Roklanská	1182,92	1177,92	5	1092,25	1086,98	5,27	0,27
Novohuťská	1168,42	1165,51	2,91	1113,6	1110,09	3,51	0,6
Studená	1121,57	1116,52	5,05	1083,1	1078,92	4,18	0,87

Tabulka 7.2: Výpočet střední kvadratické chyby rozdílů nadmořských výšek mezi DEM a geodetickými body.

Nádrž	Výškové bodové pole		DMR5G	DronDEM	Rozdíl DMR5G – geodetický bod	RMSE ₁	Rozdíl DronDEM - geodetický bod	RMSE ₂
	Kód (ČÚZK)	Hodnota						
Javoří	211	1067,16	1067,20	1156,31	0,04	0,53	89,15	89,14
	211,1	1066,84	1066,89	1155,10	0,05		88,26	
	708	1060,60	1061,51	1151,26	0,91		90,66	
	709	1060,70	1060,16	1149,16	-0,54		88,46	
Rokytká	201	1092,16	1092,43	1070,01	0,27	0,32	22,15	23,17
	201,1	1092,66	1092,30	1068,51	-0,36		24,15	
Roklanská	583	1183,22	1183,52	1097,79	0,30	0,46	85,43	87,60
	584	1183,48	1183,20	1097,14	-0,28		86,34	
	585	1181,59	1180,91	1090,66	-0,68		90,93	

Tabulka 7.3: Výpočet střední kvadratické chyby rozdílů nadmořských výšek mezi reprezentativními výškovými body DMR5G a DronDEM.

Nádrž	Reprezentativní výškové body		Rozdíl DMR5G - DronDEM [m]	Směrodatná odchylka rozdílů σ	RMSE ₃
	DMR5G [m n. m.]	DronDEM [m n. m.]			
Javoří	1049,74	1138,4	-88,66	0,47	88,98
	1062,53	1151,48	-88,95		
	1059,26	1148,4	-89,14		
	1056,68	1145,87	-89,19		
	1060,18	1149,35	-89,17		
	1066,24	1154,3	-88,06		
	1061,41	1151,07	-89,66		
Rokytká	1091,82	1069,29	22,53	0,27	22,76
	1092,63	1069,66	22,97		
	1092,92	1069,97	22,95		
	1093,08	1070,11	22,97		
	1092,29	1070,08	22,21		
	1092,83	1069,95	22,88		
	1093,22	1070,42	22,8		
Roklanská	1179,23	1089,8	89,43	0,76	89,22
	1179,18	1089,19	89,99		
	1179,5	1089,68	89,82		
	1178,79	1089,11	89,68		
	1180,34	1090,97	89,37		
	1180,62	1092,93	87,69		
	1181,03	1092,5	88,53		
Novohuťská	1166,38	1111,59	54,79	0,48	54,51
	1166,14	1111,58	54,56		
	1165,58	1111,1	54,48		
	1166,15	1111,56	54,59		
	1165,73	1111,26	54,47		
	1161,61	1106,41	55,2		
	1163,02	1109,54	53,48		
Studená	1120,67	1082,77	37,9	0,32	37,82
	1120,56	1082,62	37,94		
	1120,44	1082,88	37,56		
	1119,86	1082,12	37,74		
	1116,62	1079,16	37,46		
	1117,37	1078,88	38,49		
	1120,07	1082,44	37,63		

Z předchozích tabulek jsou zřetelné markantní rozdíly nadmořských výšek mezi oběma modely vyjádřené hodnotou RMSE. Zatímco rozdíly mezi DMR5G a výškovým bodovým polem dosahují maximálně hodnot 0,5 m, rozdíly DronDEM a výškového bodového pole jasně indikuje nadhodnocení modelů vůči výškovým bodům, přičemž hodnoty $RMSE_2$ nádrží v tabulce 7.2 jsou velmi blízké s hodnotami $RMSE_3$ v tabulce 7.3, čímž se prokazuje vhodnost umístění reprezentativních výškových bodů v obou modelech pro dané nádrže. Hodnoty směrodatných odchylek absolutních rozdílů nadmořských výšek mezi oběma modely indikují variabilitu 0,27 – 0,48 m u všech nádrží s výjimkou Roklanské nádrže, kde je variabilita hodnot absolutních rozdílů mezi výškami reprezentativních bodů nejvyšší – 1,4 m. Podrobnější analýzou bylo zjištěno, že tato relativně vysoká hodnota rozdílů výšek reprezentativních bodů mezi DMR5G a DronDEM u Roklanské nádrže je dána především rozdílnými výškami uvnitř zádržného prostoru, kde je v rámci DronDEM zachycena jemná struktura hustého nízkého porostu (viz obrázek 7.7). Rozpětí mezi maximální a minimální nadmořskou výškou u každé nádrže v tabulce 7.1 naopak ukazuje nejmenší rozdíl u Roklanské nádrže, nejvyšší u nádrží Javoří a Rokytka.

Rozdílné hodnoty mezi modelem DMR5G a DronDEM v případě všech ukazatelů zdůrazňují potenciální nepřesnosti v užití metod UAV. V případě rozdílů nadmořských výšek v řádech deseti metrů není zřejmé, z jakého důvodu je každý model nádrže DronDEM v rozdílné nadmořské výšce vůči sobě, protože pokud by byly všechny hodnoty RMSE rovny, znamenalo by to, že nadmořská výška všech modelů by byla vůči DMR5G podhodnocena v jiném výškovém systému shodném pro všechny nádrže vytvořené pomocí metod UAV. Další nejasnost vyplývá z faktu, že nádrž Javoří je jako jediná ze všech nádrží vůči DMR5G nadhodnocena.

Výškopisná korekce modelů všech nádrží byla provedena autorem přičtením (odečtením) příslušných hodnot $RMSE_3$ u každé nádrže s přihlédnutím k následujícím faktům:

- rozdíly hodnot $RMSE_2$ a $RMSE_3$ pro tři vzorkované nádrže jsou přijatelné, což naznačuje vhodnost výběru reprezentativních bodů, resp. rozdíly mezi reprezentativními výškovými body a body výškového pole u obou modelů jsou téměř totožné, a tedy aplikovatelné na zbývající dvě nádrže (Novohuťskou a Studenou), kde se geodetické body nenachází;

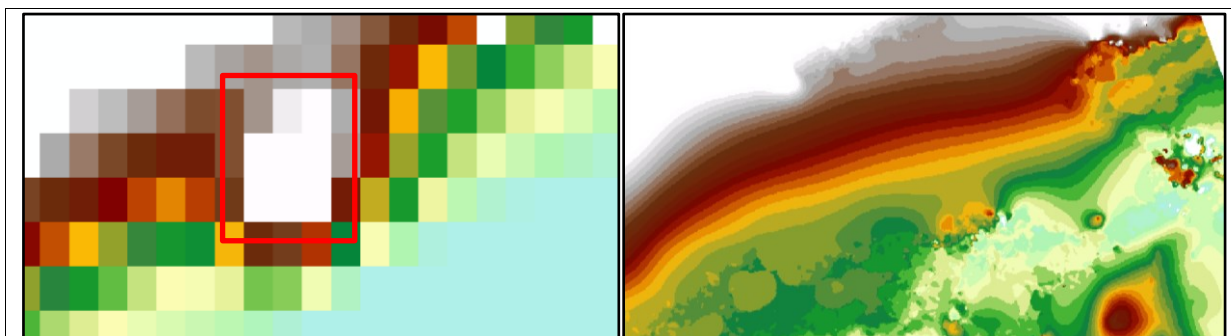
- směrodatná odchylka rozdílů nadmořských výšek mezi oběma modely je u většiny nádrží minimální, což indikuje nevelké rozdíly mezi nadmořskými výškami pro konkrétní body v rámci prostoru jednotlivých nádrží s výjimkou Roklanské nádrže, kde je variabilita rozdílů nadmořských výšek mezi modely nepříjemně vysoká. Přesto i k této nádrži bude za účelem korekce nadmořské výšky přičtena příslušná hodnota RMSE, jelikož těsnost mezi $RMSE_2$ a $RMSE_3$ pro tuto nádrž je vysoká.

7.6 Odvození parametrů plavebních nádrží

Ucelený přehled o plavebních nádržích popisují vybrané parametry, které lze vyvodit z korigovaných DMT. Hlavními charakteristikami jsou:

- maximální zatopená plocha;
- maximální hloubka;
- celkový objem;
- kvantitativní charakteristiky hráze.

Ke zjištění těchto charakteristik nejsou tak důležité přesné hodnoty nadmořských výšek jakožto spíše fakt, jestli rozpětí maximální a minimální nadmořské výšky, resp. výška mezi dnem a rovinou maximálního vzduť hladiny u každé nádrže, odpovídají reálnému rozpětí nadmořských výšek. Přesnost těchto hodnot byla porovnána vůči DMR5G v tabulce 7.1 (viz předchozí kapitola). Rozdíly se pohybují v řádech cm (nejmenší 0,27 m pro Roklanskou nádrž) až metrů (největší 2,27 m u nádrže Javoří). Vysoké rozdíly hodnot jsou způsobeny jednak rozlišením buněk 12 m² u DMR5G, které nezachycují lokální sníženiny menších rozměrů členitého terénu u některých nádrží v porovnání s DronDEM o rozlišení buněk 0,009 m². Hlavní příčinou vysoké hodnoty rozdílu mezi modely u Javoří nádrže je však skutečnost, že v zádržném prostoru DMR5G byla nalezena příliš vysoká hodnota nadmořské výšky na jednom konkrétním místě, která se v modelu DronDEM nenachází (obrázek 7.7). Tato vysoká hodnota elevace byla zřejmě šumem, který se nepodařilo odstranit v procesu tvorby DMR5G.



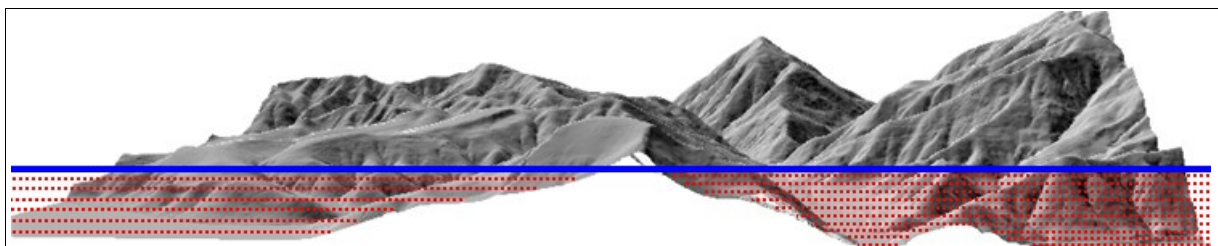
Obrázek 7.7: ilustrace vysoké lokální hodnoty elevace v DMR5G (vlevo, červený rámeček) oproti DronDEM (vpravo) v nádrži Javoří.

Ke zjištění maximální zatopené plochy bylo nutné v navazujících krocích sestavit hypsografické křivky nádrží jakožto funkci plochy nádrže závislé na hloubce, resp. výšce. Modely DronDEM a DMR5G byly nejprve ořezány linií vrstevnice zádržného prostoru, jež byla vymezena způsobem popsáným v kapitole 7.3. Následně proběhlo rozdělení a reklasifikace rastru každé nádrže na 10 prostorů, jež jsou vymezené vrstevnicemi o stejném rozpětí výškového intervalu (rozdělení četností *Equal Interval*). Každá takto vzniklá třída zaujímalá plochu ode dna nádrže až po výšku maximální vzduté hladiny. Kumulativním součtem těchto ploch v příslušných nadmořských výškách byla vykreslena křivka zatopených ploch, resp. hypsografická křivka pro každou nádrž.

Z velikosti zatopené plochy pro každý interval zvlášť bylo možné vyvodit i celkový objem nádrže (W) dle níže uvedeného vzorce:

$$W = \frac{\sum(s_i + s_{i+1})}{2} * h_i$$

kde s_i představuje plochy příslušné jednotlivým izohypsám a h_i je výškový rozdíl mezi sousedícími izohypsami. Křivky vodních obsahů byly zkonstruovány na základě kumulativního součtu výsledků objemové kapacity mezi jednotlivými izohypsami. Celkový objem pro každou nádrž získaný touto metodou byl porovnán s objemovým výpočtem v prostředí ArcMap pomocí funkce *Surface volume*, která objem počítá jakožto prostor mezi povrchem modelu a referenční rovinou v určité nadmořské výšce (obrázek 7.8). Výška referenční roviny se rovná výšce vrstevnice vymežující zádržný prostor. Kontrola prokázala, že hodnoty objemu vypočtené funkcí *Surface Volume* jsou shodné, jako výsledky vypočtené skrze výše uvedenou rovnici.



Obrázek 7.8: *Princip kalkulace objemu nádrže pomocí funkce Surface Volume v programu ArcMap (zdroj: www.pro.arcgis.com)*

Nejnižší i nejvyšší polohy v rámci nádrže jsou znázorněny v DEM jakožto buňky s minimální a maximální hodnotou nadmořské výšky. Koruna hráze je reprezentovaná vrstevnicí pro maximální vzdutou hladinu nádrže. Střední výška hráze byla určena z průměrných výšek profilů vedených napříč hrází.

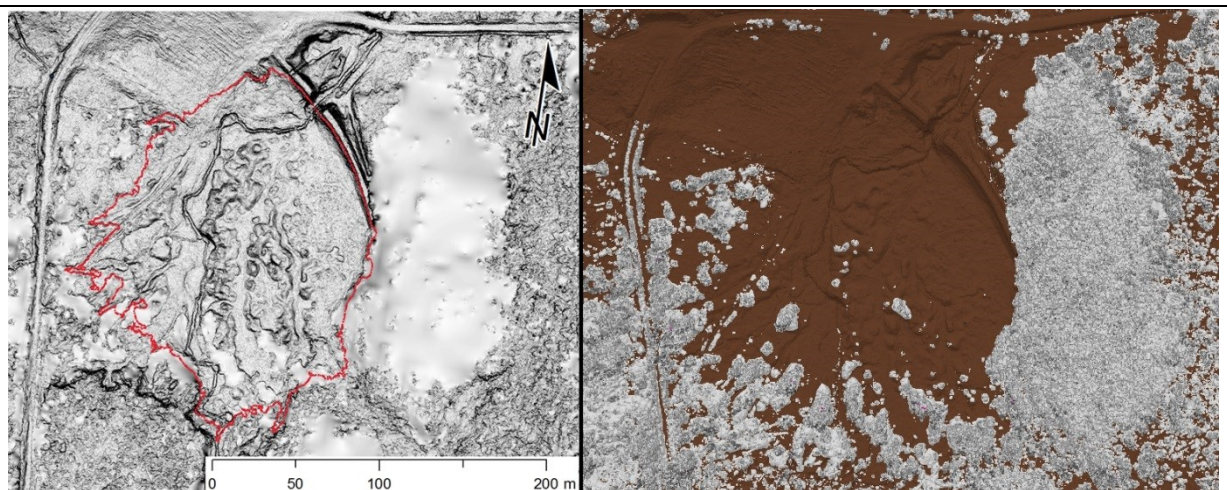
8. Výsledky

8.1 Trojdimenzionální modelování nádrží

Výsledné 3D modely území nádrží jsou zobrazeny v příloze 1. Digitální elevační modely definovaných zádržných prostorů nádrží, které prošly procesem klasifikace bodového mračna, filtrací a korekcí nadmořských výšek, jsou porovnány vůči DMR5G v příloze 3.

DronDEM s velikostí buňky 0,07 m oproti DMR5G s velikosti buňky 2 m velmi detailně znázorňuje jemnou strukturu terénu, především pak mikroreliefní tvary koryt potoků protékajících nádržemi. Uvnitř Javoří, Roklanské a Studené nádrže jsou patrné drobné shluky míst s elevací vyšší, než je okolní terén. Tyto buňky reprezentují v případě Roklanské nádrže nízkou vegetaci, jež byla automatickou klasifikací zařazena do skupiny pozemních bodů vzhledem k prahové hodnotě maximálního úhlu sklonu nastavenou na vyšší hodnotu 15°. Identifikace velikosti této hodnoty se ukázala být problémová, neboť je doporučeno použít velkých hodnot na území s výskytem svažitého terénu. To je v případě výskytu strmé hráze v nádrži a strmých sklonů vzniklých erozivní činností tekoucích vod nereálné pro správnou klasifikaci bodů, jelikož vysoké hodnoty parametru maximální sklonitosti zařadí tyto tvary terénu spolu s vegetací do skupiny ostatních bodů namísto do skupiny pozemních bodů. Zvoleným východiskem proto bylo identifikovat drobnou vegetaci uvnitř zádržného prostoru manuální klasifikací bodů s pomocí rozpoznání tvarů vegetace užitím 3D texturovaného modelu. Nicméně tento

postup pomohl odstranit povrch vegetace uvnitř DronDEM pouze částečně, neboť nádrž je hustě zarostlá vrchovištní vegetací. V takovém případě nastávají dvě situace v přístupech klasifikace typu povrchu terénu. První je, že vrchoviště je klasifikované jako terénní povrch a je tak zanedbána jeho retenční kapacita v batymetrické analýze zádržného prostoru. Druhá situace nastane, pokud je hustý porost klasifikován do skupiny ostatních bodů, kdy v takovém případě dojde při interpolaci pozemních bodů a následné tvorbě DEM k výskytu velkých shlazených ploch. Názorná ukázka je zobrazena v obrázku 8.1. Shlazené plochy představují nepřirozený průběh terénu pod vysokým vegetačním pokryvem. V případě Roklanské nádrže se takto shlazená část modelu vyskytla mimo zádržný prostor. V případě výskytu hustého vysokého vegetačního krytu uvnitř zádržného prostoru by mohl výsledný DEM obsahovat zkreslené hodnoty buněk terénu, čímž by byly ovlivněny i následné výpočty charakteristik nádrže.



Obrázek 8.1: Porovnání způsobu interpolování povrchu při tvorbě DEM z DMP. Vlevo: DEM zobrazující sklon reliéfu v okolí zádržného prostoru Roklanské nádrže (červená linie). Za povšimnutí stojí velká zhlazená plocha na východ hned vedle zádržného prostoru nádrže. Vpravo: DMP s klasifikovaným bodovým mračnem. Vpravo od nádrže opět zobrazená klasifikovaná vegetace v šedé barvě, která po interpolaci tvoří zhlazenou vrstvu v DEM.

Ukázka výskytu hustého stromoví uvnitř zádržného prostoru nádrže a následný vliv na tvorbu DEM po správné klasifikaci bodového mračna je znázorněna na DronDEM Studené nádrže v příloze 3. Interpolace pozemních bodů nedokázala správně odhadnout průběh povrchu pod stromovím uprostřed nádrže. Výsledkem je vypouklý tvar terénu přerušující průběh koryta toku. Podobné tvary se vyskytly i na okraji nádrže Javoří níže

poblíž místa potenciálního zahrazení. Relativně přesný průběh povrchu byl interpolován v DronDEM nádrží Rokytka a Novohouťská. Důvodem je absence velkého množství vegetace a jiných nerovností terénu uvnitř zádržného prostoru obou nádrží.

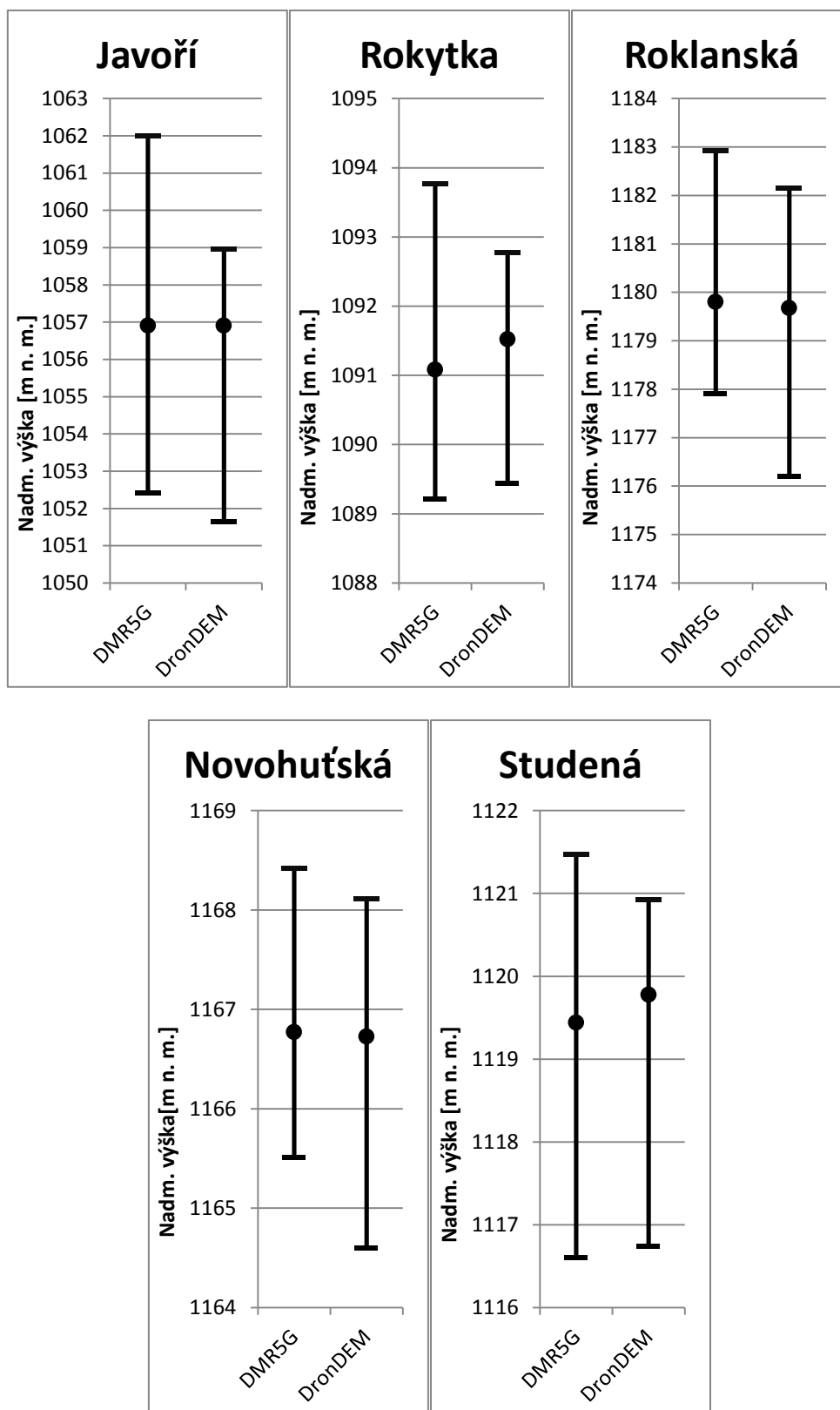
Jako výhodné se ukázalo přesné vymezení zádržného prostoru z izolinií vygenerovaných z DronDEM. Vysoké rozlišení umožnilo vykreslení velkého množství vrstevnic o intervalu 5 cm. Z hustého shluku byla manuálně zvolena taková vrstevnice, jež probíhala nejvyšším bodem koruny hráze a zároveň hráz kontinuálně spojovala. Nádrže Roklanská a Novohouťská mají probořenou část hráze. Úsek chybějící části hráze byl spojen nejbližší spojnici protilehlých bodů na koruně hráze. Průběh spojnice bylo možné identifikovat, pokud chyběla pouze malá část hráze. V případě, kdy hráz zcela chyběla, bylo nutné sledovat změny v průběhu terénu. Detailní rozlišení DronDEM umožnilo identifikovat drobné hrany terénu u Studené nádrže, kde se kdysi mohla hráz nacházet. Obtížné bylo určení hráze u nádrže Javoří, kde z 3D texturovaného modelu ani z DronDEM nebylo zcela jasné, kde se dnes absenční hráz kdysi nacházela. Nepřítomnost rysů hráze navíc neumožnila identifikovat vrstevnici vymežující zádržný prostor. Ten byl nakonec vymezen na základě volby takové izohypsy, která obíhala nádrž v místech nejvyššího možného působení vodní hladiny, jež bylo možné určit z morfologických rysů terénu v podobě náhlých strmých sklonů zachycených v DronDEM. Tato izohypsa obíhala místa maximální vzduté hladiny, v místech chybějící hráze se však nesbíhala. Místo hráze bylo hrubě doplněno v místě, kde se izohypsy od sebe začaly rozbíhat do údolí. Doplnění místa hráze je znázorněno v 3D DronDEM modelu nádrže Javoří v příloze 1. Nejsnadnější bylo vymezení zádržného prostoru nádrže Rokytka, kde hráz byla v celku.

Porovnáním rozpětí maximálních a minimálních nadmořských výšek mezi DMR5G a DronDEM si lze všimnout rozdílných hodnot. Ty byly způsobeny během procesu výškopisné korekce DronDEM, kdy k buňkám každé nádrže byla přičtena nebo odečtena příslušná hodnota $RMSE_3$ reprezentující průměrné nadhodnocení nebo podhodnocení DronDEM vůči DMR5G. Hodnoty $RMSE_3$ vypočítané v kapitole 7.5 jsou hrubými čísly výškopisných chyb DronDEM nádrží pohybující se v řádovosti desítek metrů. Takovýchto vysokých hodnot odchylek se dosáhne v případě nezahrnutí pozemních kontrolních bodů (GCP) do georeferencovacího procesu během tvorby modelu. Podobných výsledků dosáhl i Fabiano et al. (2017). Fakt, že modely byly tvořeny pouze

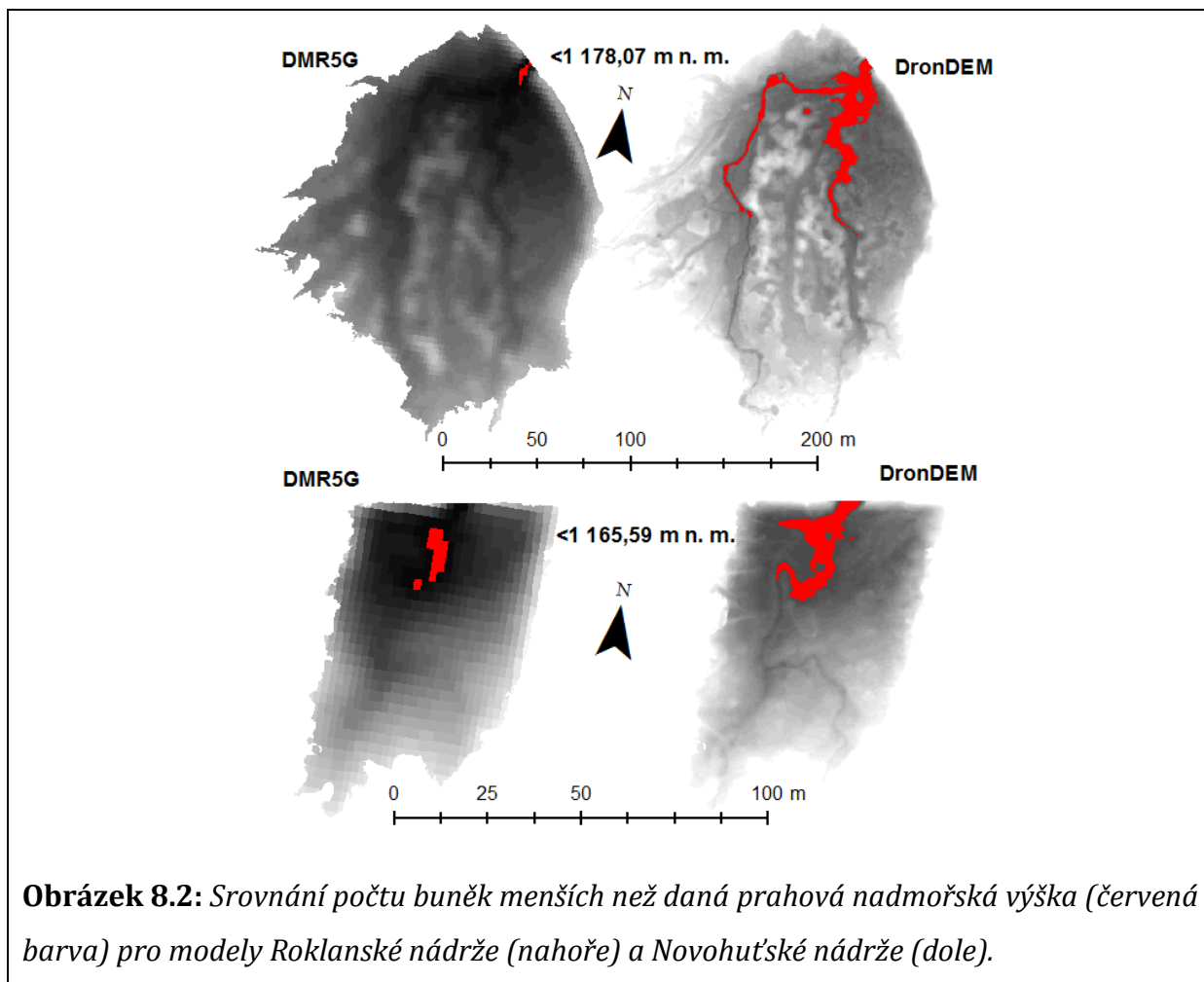
za pomoci GPS lokátoru na dronu, přičítá k výsledné výškopisné odchylce, jež byla během zpracování georeferencována do jiné nadmořské výšky.

Výsledné hodnoty maximálních, minimálních a středních nadmořských výšek po výškopisné korekci DronDEM lze porovnat vůči DMR5G na grafech 7.1. Opravou nadmořských výšek o hodnoty $RMSE_3$ bylo dosaženo přiblížení DronDEM do přibližné střední nadmořské výšky DMR5G s odchylkou v řádech desítek milimetrů u nádrže Javoří (0,005 m), jednotek centimetrů u nádrže Novohuťská (0,046 m) a desítek centimetrů u nádrží Roklanská (0,14 m), Studená (0,34 m) a Rokytka (0,44 m). Relativně velké rozdíly mezi maximálními i minimálními nadmořskými výškami napříč modely mají vícero vysvětlení. Vysoká hodnota maximální nadmořské výšky DMR5G nádrže Javoří je způsobena extrémními hodnotami buněk v konkrétním místě uvnitř modelu, které se v porovnání s DronDEM na stejném místě nevyskytují (obrázek 7.7). To s vysokou pravděpodobností poukazuje na chybné klasifikování povrchu v procesu tvorby DMR5G. Podobný problém nastal u Roklanské nádrže, kde se uvnitř DMR5G nádrže nachází buňky s vyšší hodnotou, jež ale v tomto případě poukazují na komplikovanost klasifikace bodového mračka v procesu robustní filtrace vzhledem k povaze zarostlého terénu nádrže. Celkové vyšší maximální polohy DMR5G oproti DronDEM vykazují i rozdílné umístění v modelech. Například u DronDEM Rokytka jsou buňky rastru nadmořské výšky 1092,65 m kolem celé nádrže (max. nadmořská výška), zatímco u DMR5G jsou polohy buněk se stejnou nadmořskou výškou pouze na okraji nádrže výše podél toku. Příčina může být v ořezání obou rastrů vygenerovanou vrstevnicí zádržného prostoru vyvozenou z DronDEM, která přesněji kopíruje průběh terénu. Ořezáním DMR5G touto izohypsou do modelu zahrne buňky s hrubším rozlišením a vyššími hodnotami v určitých částech modelů nádrží. Výskyty buněk s hodnotou 1092,65 m n. m. podél okraje DronDEM částečně zasahují i více směrem do zádržného prostoru, což indikuje opět shluk bodů, které nebyly během procesu klasifikace bodového mračka ve výsledku správně shlazeny s průběhem okolního terénu.

Graf 7.1: Grafy maximálních, minimálních a středních hodnot nadmořských výšek DMR5G a korigovaných DronDEM pro všechny nádrže. Zádržný prostor DMR5G byl vymezen vrstevnicí odvozené z modelu DronDEM.



Výrazné minimální hodnoty nadmořské výšky DronDEM oproti DMR5G se projevily v nádržích Roklanská a Novohuťská. Nejnižší polohy jsou rozdílné u obou modelů, přičemž hodnoty DronDEM menší, než je minimální nadmořská výška u modelů DMR5G zaujímají větší plochy, převážně podél koryt toků. Větší zastoupení minimálních poloh je v tomto přímo úměrné větší detailnosti modelu, kdy DronDEM dokáže zachytit minimální polohy dna koryt drobných vodních toků, které rozlišení buněk DMR5G zachytit nedokáže a interpoluje je do vyšších nadmořských výšek kolem koryt toků.



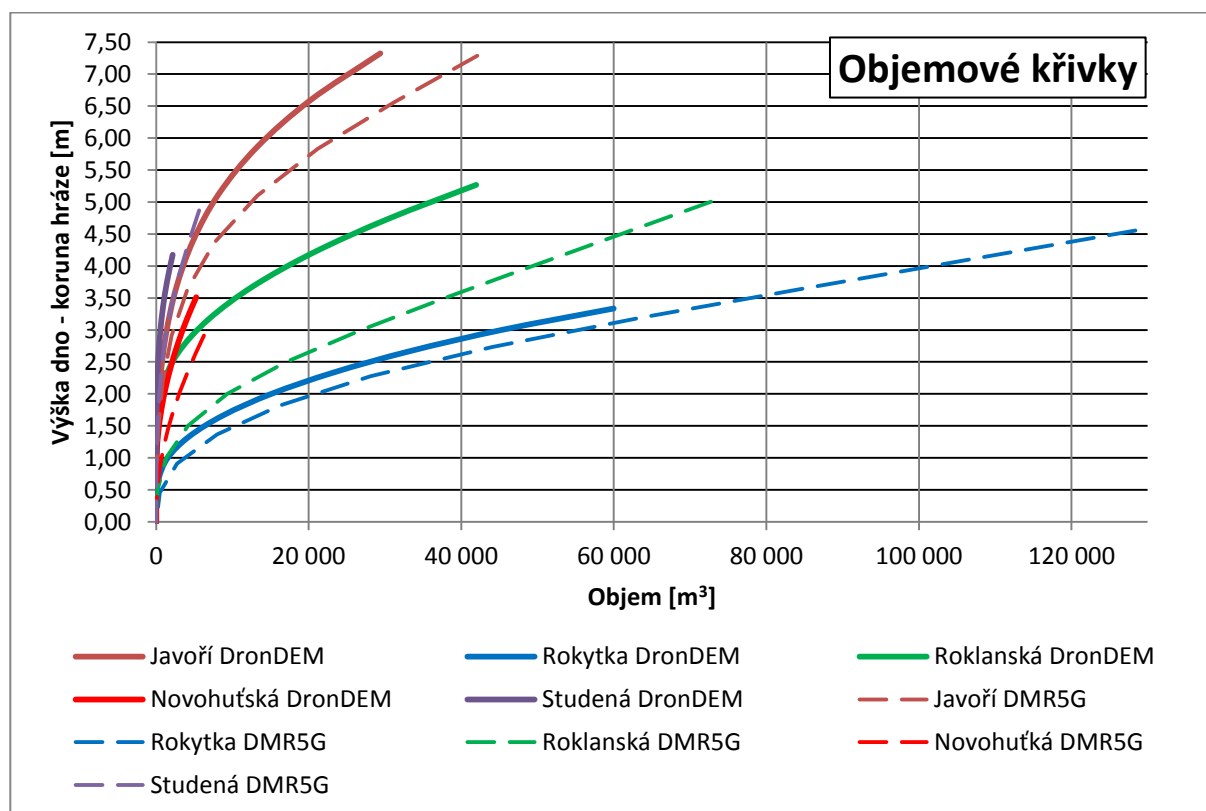
8.2 Batymetrická analýza a parametry hrází

Ze zádržných prostorů byly skrze postupy popsaných v kapitole 7.6 odvozeny batymetrické křivky zatopených ploch a objemů (graf 7.2 a 7.3). Navíc všem nádržím, vyjma Javoří a Studené, byly sestrojeny příčné profily (obrázek 8.3) a z nich vyvozené průměrné výšky hrází. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 7.1.

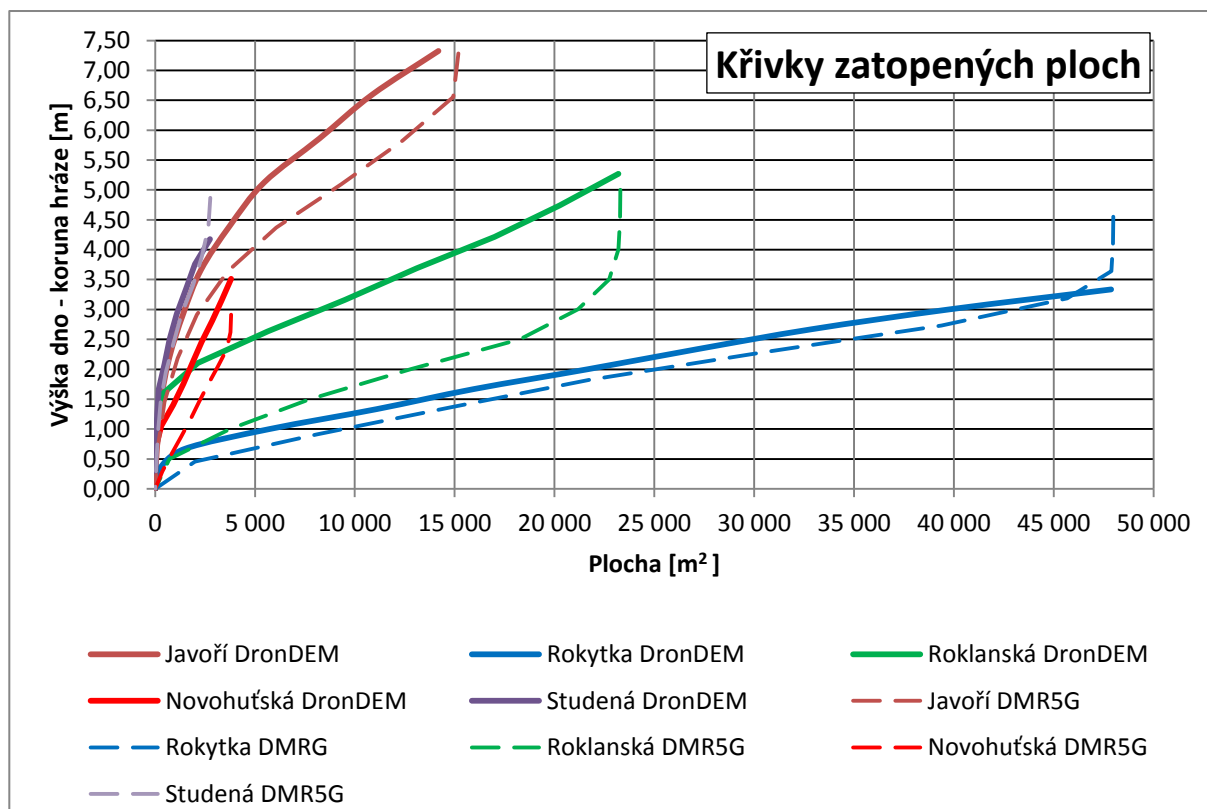
Tabulka 7.1: Výsledné parametry nádrží odvozené z DronDEM a DMR5G, porovnané s historickými údaji o objemech nádrží. Výsledky jsou zaokrouhleny na 1 desetinné místo. (zdroj historických dat: Sumavanet)

Nádrž	Hloubka [m]	Střední výška hráze [m]	DronDEM		DMR5G		Historické údaje o objemech nádrží [m ³]
			Maximální zatopená plocha [m ²]	Objem [m ³]	Maximální zatopená plocha [m ²]	Objem [m ³]	
Javoří	7,32	0	14 190	29 390	15 190	42 120	16 000
Rokytká	3,34	3	47 880	59 990	47 980	128 380	18 000
Roklanská	5,57	4,3	23 210	41 800	23 310	72 740	14 000
Novohuťská	3,51	4	3 800	5 250	3 800	6 250	15 000
Studená	4,18	0	2 740	3 150	2 760	5 630	3 000

Graf 7.2: Objemové křivky pro zádržné prostory zaniklých plavebních nádrží odvozené z modelů DronDEM a DMR5G.



Graf 7.3: Křivky zatopených ploch pro zádržné prostory zaniklých plavebních nádrží odvozené z modelů DronDEM a DMR5G.



Znatelné rozdíly lze sledovat v celkových objemech. Úzká přímá závislost se nachází ve velikosti nádrží a velikosti rozdílů objemů. Hodnoty objemů zjištěných z DronDEM jsou obecně 1,5 až 2 krát nižší, než objemy DMR5G. Model reliéfu 5G s nižším rozlišením buněk byl vymezen na základě vrstevnice zádržného prostoru vygenerované z rastru DronDEM, následkem čehož se sice dosáhlo velmi blízkých hodnot maximálních zatopených ploch, ale objemy nádrží z DMR5G dosáhly velkých hodnot vlivem okrajových buněk. Výsledné objemy se liší i v případě, že hodnoty max. zatopených ploch jsou totožné u obou modelů, jako je tomu v případě Novohuťské nádrže, kde je však rozdíl objemů nejmenší. Nejvyšší rozdíl objemů je u nádrže Rokytky. Více než dvojnásobná hodnota objemu u DMR5G oproti DronDEM je přisuzována rozdílné výšce zádržného prostoru v kombinaci s velikostí nádrže.

Větší hodnoty rozdílů mezi minimální a maximální nadmořskou výškou nádrží z DMR5G jsou výsledkem postupů, při nichž byl prostor rastru s nižším rozlišením definován na základě vrstevnice vyvozené z rastru DEM vytvořeného skrze metody UAV. Původní izohypsa vymežující zádržný prostor v tomto případě sledovala detailní průběh reliéfu v centimetrovém rozlišení. Užití izohypsy zádržného prostoru k vymezení nádrže

s rozlišením DMR5G vedlo sice k zachování tvaru nádrže, ale do modelu byly zahrnuty i buňky na okraji nádrže, jež měly nižší rozlišení a nesly informaci o vyšších hodnotách nadmořské výšky. Zahrnutím těchto hodnot do vzorce pro výpočet objemu nádrže i při použití hodnot ve funkci *Surface Volume* v programu ArcMap jsou pro tyto excesivní nadmořské výšky počítány plochy, jimž přísluší fiktivní objemová kapacita nad úrovní maximální vzduté hladiny. Tímto je poukazováno na skutečnost, že vymezení zádržného prostoru nádrže v rastru s horším rozlišením užitím odvozených izohyps z rastru o lepším rozlišení není vhodným přístupem v batymetrické analýze nádrží.

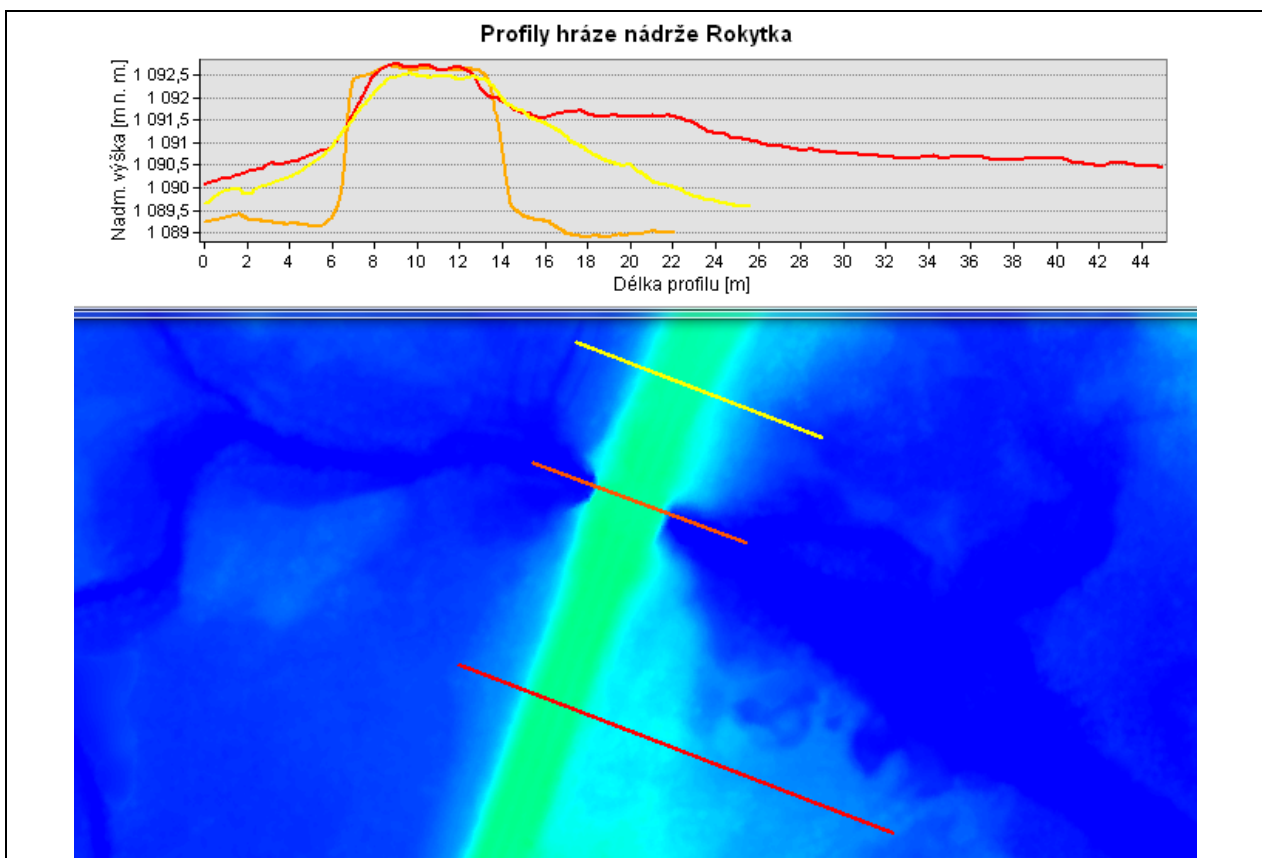
Otázku přesnosti objemů vyvozených z DronDEM lze aproximovat na příkladu objemu nádrže Rokytka, pro niž byl zkonstruován DEM na základě metod UAV v publikaci Langhammera et al. (2018). V příslušné nadmořské výšce 1092 m n. m. měla nádrž objem 53 427 m³. Objem nádrže Rokytka zjištěný skrze metodické postupy této práce činí 59 987 m³, což je vzhledem k velikosti nádrže a citlivosti reakce objemových výpočtů na zvolenou nadmořskou výšku velmi přibližný výsledek, jelikož při změně absolutní výšky volné hladiny o 0,5 m uvnitř nádrže Rokytka dochází k objemovým změnám v řádu až 19 000 m³ (viz Langhammer et al., 2018).

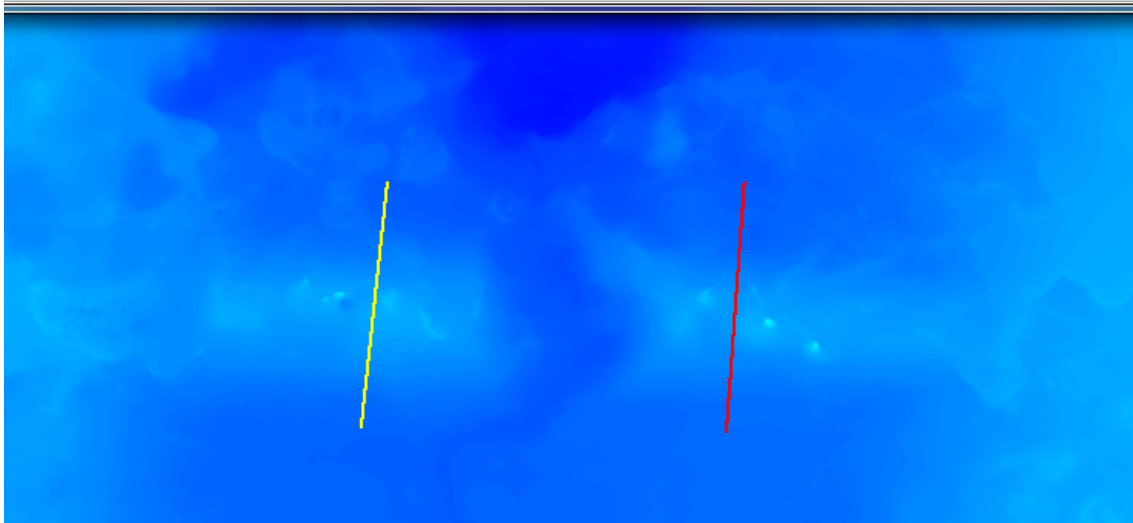
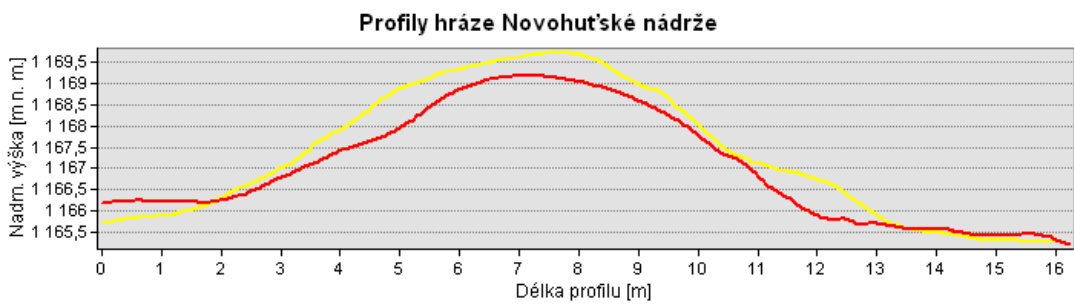
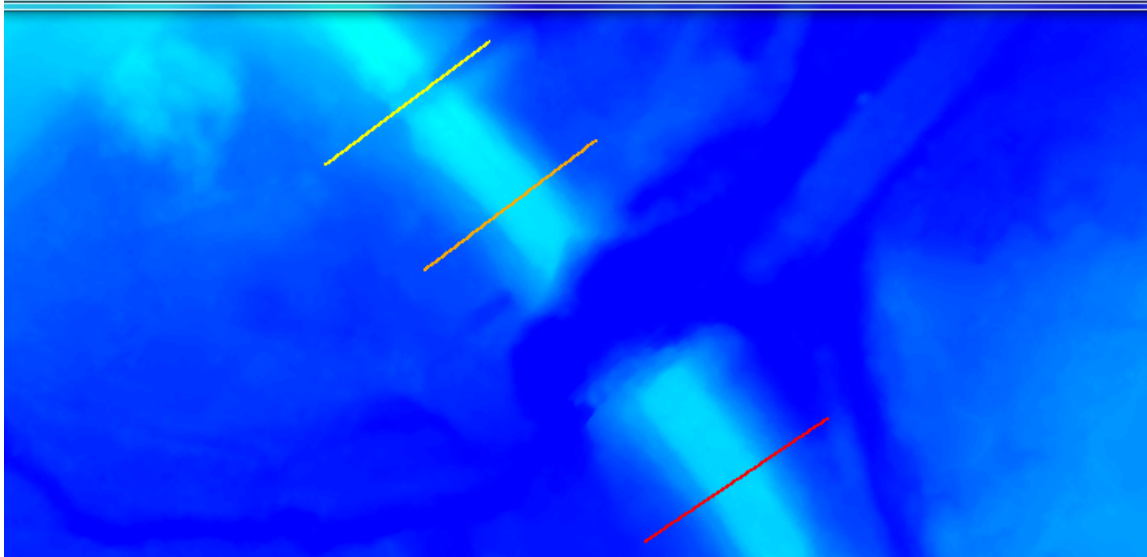
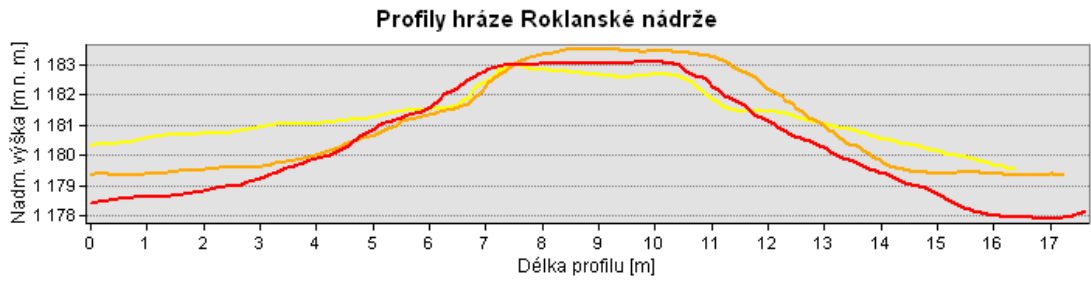
Porovnáním celkových objemů vyvozených z digitálních modelů s historickými údaji lze konstatovat, že objemy nádrží uvedené v historických pramenech jsou značně podhodnoceny s výjimkou Novohuťské a Studené nádrže. Historický údaj objemu Novohuťské nádrže je téměř 3x vyšší, než hodnota vypočtená z DronDEM. Vzhledem k absenci časového i metodického údaje o zjišťování této hodnoty se lze pouze domnívat příčiny velikosti historické hodnoty. Jedním z možných vysvětlení je zmenšení objemu nádrže vlivem postupného rozrušování, resp. snižování výšky hráze (srov. obrázek 8.3), čímž byla zmenšena i velikost původní zatopené plochy, která je viditelná v předpolí nádrže (srov. 3D modely v příloze 1). Historická hodnota objemu Studené nádrže je velmi blízká hodnotě odvozené z DronDEM. Tato zaniklá nádrž je nejmenší v povodí a navíc v jejím komplexu chybí viditelná hráz, která byla odhadnuta na základě vyvýšeného terénu v místě, kde je Studený potok příčně protínán cestou.

Křivky zatopených ploch vykazují taktéž znatelné rozdíly. Nahodnocení křivek vyvozených z DronDEM vůči DMR5G lze sledovat převážně u Javoří, Roklanské a Novohuťské nádrže. Uvnitř těchto nádrží se nachází velké množství hustého porostu nebo popadaných kmenů, jež byly zahrnuty do textury povrchu v průběhu klasifikace

pozemních bodů, čímž byly ve výsledku uměle vyvýšeny povrchy terénu těchto nádrží. V zádržném prostoru nádrže Rokytka se hustá vegetace ani pokácené kmeny stromů ve velkém množství nevyskytovaly, čímž průběh křivka zatopených ploch naopak dosahuje vysoké přesnosti v porovnání s křivkami vyvozenými z DMR5G. K povšimnutí také stojí i náhlé zvýšení gradientu křivek zatopených ploch v koncových částech křivek. Pro maximální hodnotu zatopené plochy u Rokytky a Studené nádrže existují buňky rastru s vyšší nadmořskou výškou, jež byly zahrnuty do kumulativního součtu zatopených ploch. Tyto vyšší nadmořské výšky jsou již zmíněným faktorem, který výrazně ovlivňuje výsledné objemové výpočty. Buňky s vyššími nadmořskými výškami se nachází na okrajích nádrží a úzce souvisí s problematikou detailního vymezení zádržného prostoru v modelu s vyšším rozlišením buněk (viz odst. 3 této kapitoly).

Doplňkem k batymetrické analýze bylo určení charakteru objektů, jež zahrazují nádrže Rokytka, Roklanská a Novohuťská. Přesnost digitálních modelů vytvořených metodami UAV dovoluje zobrazit výrazné morfografické rysy hrází na mikroreliefní úrovni. Detailnost modelů zachycuje ostrý přechod elevace nad výpustí u hráze Rokytky, sníženinu v rozrušené části hráze Roklanské nádrže a konvexní, rozrušený tvar hráze Novohuťské nádrže (obrázek 8.3).





Obrázek 8.3: Příčné profily nezaniklých hrází.

IV. DISKUZNÍ A ZÁVĚREČNÁ ČÁST

9. Diskuze

9.1 Otázky přesnosti modelů vytvořených skrze metody UAV

Výsledkem výzkumu této práce byla zjištěna vysoká rozlišovací přesnost modelů zaniklých plavebních nádrží vytvořených metodami UAV. Zároveň jsou však výsledné modely zatíženy chybami, jež vznikly během postupů tvorby 3D a digitálních elevačních modelů. Při procesu tvorby modelů je snaha uživatele minimalizovat nepřesnosti ve výsledném produktu. Základem ke snížení pravděpodobnosti výskytu nepřesností v modelech, resp. zvýšení polohopisné kvality, je užití vhodných technických nástrojů a postupů, které splňují alespoň minimální doporučené parametry pro tvorbu modelů.

Minimální hardwarové požadavky doporučené použitým softwarem Agisoft PhotoScan byly v této práci splněny. Užitím komerční kamery DJI Zenmuse X5, lze odhadem dle práce Passiniho a Weavera (2017) dojít k závěru, že použitý typ kamery bude mít na přesnost modelu vliv maximálně v řádech jednotek centimetrů, v nejlepším případě v řádech desítek milimetrů u kalibrovaného fotoaparátu. Nejnovějším výzkumem bylo prokázáno, že letová výška bezpilotního nosiče ani software určený pro fotogrammetrickou analýzu nemají zásadní vliv na výslednou prostorovou přesnost modelů (Azim et al., 2019).

Během tvorby modelů nádrží byly zjištěny značné odchylky v elevaci mezi DEM vytvořeným metodami UAV (DronDEM) a DMR5G. Zásadní výškopisné odchylky v řádech desítek metrů jsou způsobeny nezahrnutím GPS-zaměřených kontrolních pozemních bodů (GCP), na které jsou snímky v procesu tvorby modelů georeferencovány (viz Fabiano et al., 2017; Akturk, Altunel, 2017; Azim et al., 2019). Výšková přesnost DronDEM by tak mohla být již v počátku zpochybněna, nicméně jedním z výsledků této práce bylo prokázáno, že po manuální výškové korekci DronDEM do přibližné polohy DMR5G modelu byla vnitřní variabilita rozpětí mezi maximální a minimální nadmořskou výškou pro všechny nádrže přibližně zachována. Po výškopisné korekci se odchylky od průměrné nadmořské výšky pohybovaly v řádech desítek centimetrů. Nezahrnutím GCP do procesu tvorby modelů však lze dosáhnout uspokojivých výsledků. Azim et al. (2019) rektifikovali UAV-vytvořenou ortomozaiku polí v programu QGIS na základě snímků z Google Earth a vektorových linií

s polohovými údaji automatického řízení polních tahačů. Výsledky prokázaly, že hodnota RMSE mezi snímky Google Earth a UAV ortomozaikou je 1,4 m a 1 m v porovnání s rektifikací vůči vektorovým liniím, což autoři vyhodnotili jako přijatelnou chybu pro účely aplikace v zemědělství (Azim et al. 2019). Pro účely této práce se dá říct, že polohová i výšková přesnost modelů byla dostačující pro další zpracování modelů. Je však nutné podotknout, že se zahrnutím narůstajícího počtu GCP do procesu tvorby modelů asymptoticky roste jejich celková prostorová přesnost až do určitého limitního počtu těchto bodů (Gindraux et al., 2016).

Digitální elevační modely nádrží vzniklé metodami UAV lze použít pro dedukci batymetrických charakteristik, pakliže je zachována vnitřní variabilita nadmořských výšek, kdy rozpětí mezi minimální a maximální nadmořskou výškou nádrže musí odpovídat realitě. Zde nastává relativně komplikovaný úkol v minimalizaci chyb, které se mohou vyskytnout v jednotlivých krocích napříč procesem tvorby modelů a projevují se v modelu, tím pádem ve výsledných batymetrických výpočtech. Tyto chyby lze vyčíst následovně: (1) výskyt tzv. *noise points* v hustém bodovém mračnu v podobě výškových bodů reprezentujících určitou formu šumu; (2) nesprávně klasifikované pozemní body jakožto výsledek nastavení homogenních hodnot klasifikace pozemních bodů (sklon, velikost buňky, vzdálenost mezi body) pro heterogenní reliéf; (3) interpolace terénu při tvorbě DEM pod hustým vegetačním pokryvem tvoří shlazené plochy s nepřírozeným průběhem. Předchozí chyby lze redukovat skrze vývoj klasifikačních algoritmů, jež by byly schopny před samotným procesem tvorby DEM jednoznačněji identifikovat body klasifikované jako „šum“ a „vegetace“. Otázkou však je, jakým způsobem by byl terén interpolován v případě území hustě zarostlým nízkou kompaktní vegetací. Obtíže s odstraněním vegetačního krytu užitím softwarových algoritmů vnímá řada autorů (např. Koci et al., 2017, Beni et al., 2018; Langhammer et al., 2018). Návrh pro lepší klasifikaci by mohl představovat algoritmus, který by byl schopen klasifikovat body na základě barvy. Vegetační kryt vesměs v odstínech zelené by tak byl přesněji odhadnut, jelikož husté bodové mračno v sobě uchovává i informaci ohledně barvy. Důvod prezence šumných bodů v 3D modelu je zatím neznámý, mohl by však představovat náhodnou chybu, jež se v průběhu pořizování snímků objeví na objektivu fotoaparátu nebo mezi čočkou a snímaným objektem. To ovšem nemusí vysvětlovat prezenci šumných bodů nacházejících se v 3D modelu pod povrchem terénu.

Omezení přesnosti UAV-DEM sumarizuje Beni et al. (2018) následovně: fotogrammetrické podmínky o nízké kvalitě, kalibrace fotoaparátu, klasifikace bodového mračna, dostupnost pozemních bodů pro výškovou korekci modelu a procesní čas.

Vezmeme-li v potaz všechny předchozí faktory, dostáváme se k otázce samotné vhodnosti UAV modelů pro jejich užití k vyvození batymetrických charakteristik. V případě redukce všech předchozích chyb lze dosáhnout přesného podkladu k vyvození (nejen) retenčního potenciálu zkoumané části krajiny, neboť DEM vytvořené skrze UAV metody stále zůstávají vysoce detailním zdrojem prostorových informací relativně malého území díky rychlému způsobu sběru dat a softwarovému propojení, které umožňuje extrahovat objemné kvantify polohopisných i výškopisných dat vztažených na prostorovou jednotku. Souběžně s výhodami užitím UAV metod v geografii jde i zkušenost zpracovatele těchto dat. Fotogrammetrické softwary nabízí celou řadu automatických postupů, jimž však přísluší i kontrola, případně manuální úprava výsledného produktu. Ve výsledku je samotný proces sběru geodat skrze metody UAV srovnatelně rychlý, nicméně další zpracování dat je relativně náročné na aplikační požadavky, přičemž procesní čas je delší s přibývajícím množstvím vstupních dat. Dle Koci et al. (2017) stále existují nejistoty v návrhu postupu za účelem dosažení co největší přesnosti při co nejnižším času nezbytnému ke zpracování modelu.

9.2 Otázky uplatnění zaniklých plavebních nádrží v protipovodňové ochraně

Digitální modely vytvořené skrze metody UAV poskytly podklad pro batymetrické, potažmo volumetrické výpočty zaniklých plavebních nádrží na Šumavě. Volumetrické výpočty byly u některých nádrží zatíženy hustým vegetačním krytem, který nebyl v modelu DronDEM na rozdíl od DMR5G zcela odfiltrován. Přesto lze na základě (1) podobných objemových výpočtů nádrže Rokytka v práci Langhammera et al. (2018); (2) shodami mezi objemy vypočtených v prostředí GIS i skrze vzorec pro výpočet objemu nádrže; (3) a přibližné shody elevací mezi modely po výškopisné korekci usoudit, že prostor vymezený vrstevnicí maximálního zádržného prostoru je velmi přibližný realitě. Objemové hodnoty nádrží nebo digitální (3D) modely získané skrze postupy této práce lze použít jako vstupy o údajích retenčních nádrží do hydrologického modelování. Doporučením však zůstává porovnat takto získané parametry s pozemním měřením u

více nádrží za účelem potvrzení, nebo i případné vyvrácení vysoké polohopisné či výškopisné přesnosti UAV-DEM.

Maximální objemová kapacita nádrží byla vymezena na základě izohypsy procházející korunou hráze. Nicméně je třeba počítat s vymezením ochranného prostoru, jehož volná hladina se nachází o něco níže, než je koruna hráze. Navíc v případě dvou nádrží byla identifikována absence hráze, dvě nádrže měly hráz protrženou. Pro obnovení retenčního potenciálu nádrží je vyžadována výstavba či rekonstrukce těchto hrází, z čehož vyplývá, že v momentálním výchozím bodě nelze hodnotit aktuální retenční kapacitu, nýbrž potenciální kapacitu nádrží vyvozenou z předpokladu budoucí existence chybějících celků či částí hrází.

Zakládáním na platnosti výsledných hodnot jednotlivě vyvozených objemů pro každou nádrž by všechny nádrže dohromady byly schopny zadržet vodu o celkovém objemu 139 580 m³ na rozloze 9,18 ha, což přibližně odpovídá objemu vodní nádrže Štramberk v Moravskoslezském kraji o objemu 137 500 m³ a rozloze 6,4 ha. Do nádrží by přitékala voda z území o celkové rozloze 1 345 ha, což představuje 28,3% plochy povodí Roklanského potoka.

Transformace průtoků kulminační vlny decentralizovanými MVN se ukázala být efektivní v případě zapojení čtyř klauz v povodí Rolavy během hydrologického modelování srážko-odtokové události (Taufmannová, Jeníček, 2011). Zapojením všech klauz o celkovém objemu 856 640 m³ odvodňujících území o celkové velikosti 43,1 km² došlo k redukci průtoků s dobou opakování 100 let až o 19,1%. Šumavské klauzy o modelovaném objemu 139 580 m³ odvodňují území o velikosti 13,45 km². Hydrologické modelování transformačního účinku nádrží nebylo hlavním předmětem této práce, a proto zde nejsou uvedeny teoretické hodnoty transformačního účinku. V závislosti na poloze, celkovém objemu, odvodňovanému území a velikosti N-letých průtoků evidovaných v hlásném profilu Modrava však lze hrubě odhadnout, že transformační účinek těchto nádrží bude v porovnání s klauzami v povodí Rolavy procentuálně menší. Podklady této práce však mohou sloužit jako vstupy do jiného výzkumu zabývající se účinkem klauz na transformaci povodňové vlny, která může toto tvrzení ve výsledku upřesnit.

Vhodnost polohy nádrží v pramenných oblastech Šumavy by měla být zkoumána z hlediska jejich budoucího vodohospodářského přínosu i negativním dopadům

v krajině. Četné výzkumy v této oblasti prokázaly stále probíhající změny hodnot klimatických prvků v souvislosti se změnami hydrologického režimu za posledních 40 let. Dlouhodobá bilance mezi srážkami a odtokem zůstala neměnná (Kliment, Matoušková, 2008a; 2008b; Laghammer et al., 2015), avšak došlo ke zdvojnásobení událostí s kulminačním průtokem a přesunu jejich temporálního výskytu na sklon mezi zimními a jarními měsíci. Zvýšení průměrné roční teploty od roku 1980 o 1,5°C přispělo ke změně podílu pevného skupenství srážek na kapalné i ke všeobecnému rychlému tání sněhové pokrývky (Langhammer et al., 2015). Pro celou Českou republiku včetně pramenných oblastí Šumavy je na druhou stranu predikován celkový pozvolný úbytek odtoku (obrázek 1.2, Pretel, 2011). V tomto kontextu budou kulminační průtoky představovat události s extrémní vodností v dlouhodobě trvajícím období, které bude relativně chudé na průtoky. Důležitost povodní proto bude možná spočívat ne v jejich zmírnění skrze detenční mechanismy krajiny, ale k celkové snaze retence vodního objemů těchto náhle se vyskytujících událostí. Hlavní role klauz by proto mohla spočívat spíše v minimalizaci dopadů sucha na okolní krajinu.

Zahrazením klauz a instalací výpustních objektů do tělesa hrází se vytvoří plochy stálého zadržetí, které by pomáhaly udržovat stabilitu okolního ekosystému – již v minulosti postiženém katastrofickými událostmi, jakými byly kůrovcová kalamita nebo polomy. Z hlediska volby účelu klauz je možnost využít zásobní prostor v podobě detenčních nádrží nebo retenčních nádrží, avšak retence vody v krajině, resp. obnova řízeného poldru, by byla vzhledem k předpovídaným hodnotám odtoků v kontextu klimatických změn přínosnější. Trvale zadržovaná voda navíc pozitivně ovlivňuje hladinu podzemní vody v okolí nádrže, čímž může dojít k udržení ekologických podmínek během období sucha. Retenční potenciál krajiny v okolí nádrží je podporován lesním porostem (Kliment, Matoušková, 2008a). Nádrže, na jejichž území se nachází rašeliniště, by mohly vykazovat komplikovanější odtokový režim. Vysoká hladina podzemní vody v blízkosti retenčních nádrží by mohla negativně ovlivnit retenční schopnost rašelinišť (viz Vlček et al., 2012).

Decentralizované malé vodní nádrže (MVN) jsou vnímány jako vhodný nástroj ke zlepšení retenční schopnosti krajiny v porovnání ke koncentrovanému budování velkých technických struktur níže podél toku (Bellu et al., 2015). Jejich umístění, počet a velikost zádržného prostoru však závisí na komplexních fyzicko-geografických podmínkách.

Před samotnou realizací výstavby početných MVN by měl existovat kompromis vzhledem k navrhovanému průtoku v porovnání s výstavbou menšího počtu větších vodních děl s účelem transformace stejně velké průtokové vlny. MVN se v některých případech můžou ukázat jako méně efektivní v porovnání s výstavbou velké vodní nádrže na stejném území, nebo v porovnání s preferovanou aforestací území, jež rovněž podporuje retenční potenciál krajiny (Reinhardt et al., 2011; Bellu et al., 2015).

Rekonstrukce zaniklých plavebních nádrží spadají do kategorie strukturálních protipovodňových opatření za účelem kontroly objemu vody v krajině. Tento přístup by mohl vyžadovat inženýrské práce s určitou mírou zásahu do přírodního prostředí a specifické plánování. Strukturální povodňová opatření tak často bývají předmětem kritiky (Pacione, 1999).

Zaniklé klauzy v pramenných oblastech Šumavy poskytují již připravený detenční prostor. S přihlédnutím k ochraně vzácného ekologického dědictví na území NP Šumava může být alternativním hlediskem konstrukce těchto nádrží v jiných, více vhodných místech. V zahraničí některé směrnice a pokyny pro kontrolu eroze uvádí jako vhodné vyhloubení detenčních prostor ihned pod jakýmkoliv vymýceným povrchem níže v povodí za účelem zadržení splavených sedimentů a zmírnění odtoku z bleskových povodní (Pacione, 1999). Vymýcené povrchy představují vykácené lesy bez vegetace nebo i větší staveniště s odstraněným pokryvem. Budování detenčních prostor v adekvátních lokalitách je tedy námětem k diskuzi pro jiné výzkumné práce a projekty, které by v poslední fázi realizace pravděpodobně spadaly do studie EIA, jež je vymezena v zákoně č. 100/2001 sb., o posuzování vlivů na životní prostředí, které však spadá mimo rámec této diplomové práce.

10. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vyhodnocení potenciálu metod UAV v přesné tvorbě 3D a digitálních elevačních modelů malých vodních nádrží skrze fotogrammetrické postupy. Vstupní data představovaly snímky pořízené fotoaparátem připevněným k dronu vybaveným GPS systémem, který každému snímku přiřazoval prostorovou informaci.

Z celkem 1 458 snímků pěti zaniklých plavebních nádrží bylo v programu Agisoft PhotoScan skrze proces *workflow* vyhotoveno pět texturovaných 3D modelů a hustá síť bodových mračen. Procesní čas pro jednu nádrž trval v průměru 50 hodin počínaje seřazením snímků a konče vyhotovením texturovaného modelu. Texturované modely

nádrží následně posloužily v procesu klasifikace bodových mračen. Mračna obsahovala hlukové body nacházející se pod průměrnou úrovní terénu i izolovaně v extrémní nadmořské výšce nad povrchem. Tyto body s extrémní odchylkou bylo nutné manuálně odstranit a provést nejdříve automatickou, posléze manuální klasifikaci bodového mračna s cílem separace bodů reprezentujících terén od bodů reprezentujících vegetační pokryv. Klasifikací byly odlišeny pozemní body od ostatních bodů, z nichž byly vzápětí vytvořeny digitální modely povrchu a elevační modely užitím interpolačního algoritmu typu *natural neighbour*. Modely byly označeny akronymem DronDEM. Výsledky tohoto dílčího cíle poukázaly na zatížení všech modelů nádrží chybnými elevačními hodnotami v podobě hlukových bodů *noise points* a body mračna reprezentujících vegetační pokryv, které byly špatně klasifikovány do kategorie pozemních bodů vlivem nastavení homogenních hodnot parametrů klasifikačního algoritmu pro heterogenní průběh povrchu. Absolutní přesnost 3D modelů a DEM proto závisí na dokonalém odstranění všech hlukových bodů a důkladné klasifikaci povrchu, což je v případě vysoké kvantity prostorových informací obtížný úkol vyžadující delší čas i zkušenosti.

Absolutní nadmořské výšky všech DronDEM nádrží byly nadhodnoceny nebo podhodnoceny vůči DMR5G. Příčinou bylo nezahrnutí GPS zaměřených kontrolních pozemních bodů do procesu tvorby 3D modelu. Rešerší jiných zdrojů bylo však zjištěno, že vnitřní variabilita nadmořských výšek není tímto faktem zatížena. Průměrná nadmořská výška DronDEM vůči DMR5G byla opravena o hodnotu střední kvadratické chyby rozdílů elevací mezi reprezentativními body v obou modelech nacházejících se na rovných površích. Oprava o hodnoty RMSE prokázala velmi dobrou shodu průměrných nadmořských výšek mezi oběma modely v řádech milimetrů až desítek centimetrů.

Rastry digitálních elevačních modelů o rozlišení buňky 7 cm disponovaly dostatečnou přesností pro vygenerování vektorových vrstevnic o výškovém intervalu 5 cm. Tento přístup umožnil výběr vrstevnice vymezující maximální zádržný prostor každé nádrže, splňující kritérium souvislého průběhu korunou hráze nebo morfologickým rysem terénu podél břehu nádrže. Zvolená izohypsa se ukázala být nejpřesnější prostorovou definicí prostoru u všech nádrží.

Z rastrů nádrží DronDEM a DMR5G byly vyvozeny křivky zatopených ploch, objemové křivky a parametry hráze. Křivky byly sestrojeny na základě reklasifikovaných rastrů nádrží, kde četnosti výšek a jim příslušné plochy byly rozděleny do deseti stejně velkých

intervalů. Grafická podoba zatopených ploch nádrží znázorňuje celkové podhodnocení křivek DronDEM vůči křivkám DMR5G pro příslušné zatopené plochy, což je výsledkem prezenze neodstraněného kompaktního vegetačního krytu uvnitř některých nádrží, který je mimo jiné produktem nastavení parametrů během procesu automatické klasifikace. Koncovým částem křivek z DMR5G u některých nádrží přísluší značně vyšší elevační hodnoty, než u DronDEM. Toto extrémní nadhodnocení bylo vysvětleno vlivem okrajových buněk DMR5G, které byly do DMR5G o nižším rozlišení buněk zahrnuty ořezáním detailní vrstevnice vyvozené z DronDEM a větším rozlišením. Tyto buňky na okrajích nádrže DMR5G nakonec představují vyšší elevační hodnoty nacházející se nad korunou hráze, jež ve výsledku ovlivnily i nadhodnocení celkových objemů nádrží DMR5G vůči DronDEM. Značné rozdíly hodnot mezi oběma modely ve výsledku poukázaly na citlivost batymetrické analýzy závislé na procesu klasifikace bodového mračna v procesu tvorby DEM a výskytu okrajových buněk.

Potenciál UAV metod pro rekonstrukci zaniklých plavebních nádrží lze zhodnotit jako velmi přesný při přibližném zachování vnitřní variability rozpětí mezi maximální a minimální nadmořskou výškou ve srovnání s DMR5G. Skrze postupy UAV fotogrammetrických metod byl zjištěn celkový objem nádrží 139 580 m³ na rozloze 9,18 ha, což představuje retenční kapacitu nádrže řadící se stále ještě do kategorie malých vodních nádrží. Porovnáním celkového objemu klauz v povodí Roklanského potoka s výzkumem retenčního potenciálu klauz v povodí Rolavy lze odhadnout, že v případě výskytu povodně s průtokem Q100 by transformace kulminační vlny při zapojení všech klauz v povodí Roklanského potoka byla menší, než 19%. Toto tvrzení je však zároveň podmínkou k jeho otestování a poznatky ohledně batymetrických charakteristik zjištěné postupy této práce mohou být použity jako vstupy do následných hydrologických modelování.

Seznam literatury a zdrojů

Agisoft LLC (2016): *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2*, 97 s.

AOPK ČR. *Ramsarská úmluva* [online]. Citováno dne 13.11.2018, dostupné z: <<http://www.ochranaprirody.cz/mezinarodni-spoluprace/mezinarodni-umluvy/ramsarska-umluva/>>

AKTURK, E., ALTUNEL, A. O. (2017): *Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain*. *Measurement*, 136 (2019), s. 382-386.

ALBRECHT, J. et al. (2003): *Chráněná území ČR. VIII., Českobudějovicko*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 807 s. ISBN: 80-86064-65-4

ArcČR® 500. *Digitální vektorová geografická databáze České republiky*. Citováno dne 21.4.2018, dostupné z <<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500>>

ASCE (American Society of Civil Engineers; 2013): *Guidance for Protection of Public Safety at Urban Stormwater Management Facilities*. Reston. Virginia, 120 s. ISBN 978-0784413708.

AZIM, S., et al. (2019): *Manual geo-rectification to improve the spatial accuracy of orthomosaics based on images from consumer-grade unmanned aerial vehicles (UAVs)*. *Precision Agriculture*, s. 1-12. DOI:1007/s11119-019-09647-9

BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): *Geomorfologické členění reliéfu Čech*. Kartografie Praha, Praha, 79 s. ISBN 80-7011-913-6

BARRY, P., COAKLEY, R. (2013): *Field accuracy test of RPAS photogrammetry*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), s. 27-31.

BELLU, A., et al. (2015): *Framework model for the dimensioning and allocation of a detention basin system: The case of a flood-prone mountainous watershed*. *Journal of Hydrology*, 553, s. 567-580. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.043

- BENI, L. H. et al. (2018): *Challenges and Opportunities for UAV-Based Digital Elevation Model Generation for Flood-Risk Management: A Case of Princeville, North Carolina*. *Sensors*, 18(11). 2018. DOI: 10.3390/s18113843
- BĚLKA, L. et al. (2015): *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace DMR 5G*. Zeměměřický úřad, Pardubice, 12 s.
- BHARDWAJ, A. et al. (2016): *UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects*. *Remote Sensing Environment*, 175, s. 196-204.
DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.029
- BOELSCHER, J., SCHULTE, A., HUPPMANN, O. (2010): *Long-term flow field monitoring at the Upper Rhine floodplains*. Conference paper . *RiverFlow 2010*, 1, s. 477-485.
- CHAPLIN, N (2003): *Personal Injury Litigation as a Barrier to the Adoption of Sustainable Drainage Ponds-A proposal for Legislative Form*. 83 s.
- CORINE Land Cover (2006, 2012, 2018) [online]. Citováno dne 12.2.2019, dostupné z: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- ČGS (Česká geologická služba). *Geologická mapa 1:50 000*, listy 22-33, 32-11, Praha, 1998.
- ČHMÚ (2019): *Evidenční list hlásného profilu č. 112*. [online]: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307241
- ČSN 75 2410 (2011). *Malé vodní nádrže*.
- ČURDA, J., JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2011): *Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí Vydry*. *Geografie*, 116, č. 3, s. 335-353.
- ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální). *Základní báze geografických dat České republiky* [online]. Citováno dne 21.2.2018, dostupné z: <https://www.cuzk.cz/>
- EEA (European Environmental Agency; 2009): *EEA Signals 2009: Key Environmental Issues Facin Europe*. 40 s.
- FABIANO, D., et al. (2017): *Accuracy analysis of orthomosaic and DSM produced from sensor aboard UAV*. Conference: *Brazilian Symposium on Remote Sensing*. Santos, s. 5515-5522.

- FEDOROV, M., et al. (2016): *Site selection for flood detention basins with minimum environmental impact*. Procedia Engineering, 165, s. 1629-1636. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.903
- FRÉLICOVÁ, J., et al. (2014): *Integrated assessment of ecosystem services in the Czech Republic*. Ecosystem Services, 8, s. 110–117. DOI: 10.1016/j.ecoser.2014.03.001
- GINDRAUX, S., BOESCH, R., FARINOTTI, D. (2016): *Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers*. Remote sensing 2017, 9 (186), 15s. DOI: 10.3390/rs9020186
- HANSEN, J. J. (2011): *Hazard Assessment for Water Retention and Detention Ponds*. National Fire Academy. 64 s.
- HEIS VÚV TGM (Hydroekologický informační systém VÚV TGM; 2019). [online:] <https://heis.vuv.cz/>
- IPCC (International Panel for Climate Change; 2015): *Climate Change 2014: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. 31 s.
- JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2007): *Retenční potenciál v pramenných oblastech toků*. In Langhammer, J. ed. (2007): *Povodně a změny v krajině*. MŽP ČR a PřF UK, Praha, s. 307-315. ISBN 978-80-86561-86-8
- JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2008): *Peat Bogs Influence on Runoff Process: Case Study of the Vydra and Křemelná River Basins in the Šumava Mountains, Southwestern Czechia*. Geografie – Sborník České geografické společnosti, 113, č. 4, s. 383-399.
- JONES, J. E. et al. (2013): *Public Safety at Stormwater Management Facilities*. Water Environment Federation Stormwater Report, Reston, Virginia. [online:] <https://stormwater.wef.org/2013/05/public-safety-at-stormwater-management-facilities/>
- KABELKA, T. (2016): *Stanovení konsumpčních křivek na vybraných hydrologických profilech KFGG*. Diplomová práce. PřF UK, KFGG, Praha, 100 s.
- KEßLER et al. (2016): *Chemical effects of a near-to-nature detention pond on a small urbanheadwater*. Limnologica, 62(2017), s. 118-125.

- KOTTEK, M., et al. (2006): *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Meteorologische Zeitschrift, 15, s. 259-263. DOI: [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130).
- KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2008a): *Long-term Trends of Rainfall and Runoff Regime in Upper Otava River Basin*. Soil & Water Res., 3, s. 155-167.
- KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2008b): *Runoff Changes in the Šumava Mountains (Black Forest) and the Foothill Regions: Extent of Influence by Human Impact and Climate Change*. Water Resources Management, 23(9), s. 1813-1834. DOI: 10.1007/s11269-008-9353-6
- KNILL, O., RAMIREZ-HERRAN, J. (2007): *On Ullman's Theorem in Computer Vision*. 16 s. [online:] https://www.researchgate.net/publication/1760725_On_Ullman%27s_theorem_in_computer_vision
- KOCI, J., et al. (2017): *Assessment of UAV and Ground-Based Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry in a Gullied Savanna Catchment*. International Journal of Geo-Information , 6(11), 23 s. DOI: 10.3390/ijgi6110328
- KRATOCHVÍL, S. (1961): *Vodní nádrže a přehrady*. Československá akademie věd, Praha, 954 s.
- KRÁLOVEC, V., KLIMENT, Z., VLČEK, L. (2016): *Hodnocení retence vody v půdě v lesním a nelesním prostředí*. Zprávy lesnického výzkumu, 61, s. 181-189.
- KUMMU, M. (2008): *Water management in Angkor: Human impacts on hydrology and sediment transportation*. Journal of Environmental Management, 90(3), s. 1413-1421. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.08.007
- LANGHAMMER, J., VILÍMEK, V. (2007): *Landscape changes as a factor affecting the course and consequences of extreme floods in the Otava river basin, Czech Republic*. Environmental Monitoring and Management, 144(1-3), s. 53-56.
- LANGHAMMER, J., SU, Y., BERNSTEINOVÁ, J. (2015): *Runoff Response to Climate Warming and Forest Disturbance in a Mid-Mountain Basin*. Water 2015, 7, s. 3320-3342. DOI: 10.3390/w7073320

- LANGHAMMER, J., BERNSTEINOVÁ, J., MIŘIJOVSKÝ, J. (2017): *Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring*. *Water* 2017, 9(11), 22 s. DOI:10.3390/w9110861 IF=1.832
- LANGHAMMER, J., JANSKÝ, B., KOCUM, J., MINAŘÍK, R. (2018): *3-D reconstruction of an abandoned montane reservoir using UAV photogrammetry, aerial LiDAR and field survey*. *Applied Geography*, 98, s. 9-21. DOI: 10.1016/j.apgeog.2018.07.001
- LANGHAMMER, J., VACKOVÁ, T. (2018): *Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry*. *Pure and Applied Geophysics*, 175(9), s. 3223–3245. DOI:10.1007/s00024-018-1874-1 IF = 1.652
- LCCD (Laramie County Conservation District; 2016): *Best Management Practices for Stormwater Runoff: Ponds*. Cheyenne, Wyoming, 2 s. Dostupné z: <http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/1348/1/Best%20management%20practices%20for%20stormwater%20runoff.pdf>
- LEIPETLOVÁ, P. (2010): *Akumulační a retenční nádrže v Česku*. Bakalářská práce, PřF UK, Praha, 80 s.
- LENDZIOCH, T., LANGHAMMER, J., JENÍČEK, M. (2019): *Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry*. *Sensors* 2019, 19(5), 1027. DOI:10.3390/s19051027
- LIEBL, D. S. (2006): *Stormwater Detention Ponds Site Safety and Design*. Solid and Hazardous Waste Education Center, University of Wisconsin-Extension, 4 s. [online:] <http://clean-water.uwex.edu/pubs/pdf/safety.pdf>
- LIU, Y., Bralts, V., ENGEL, N. A. (2014): *Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model*. *Science of Total Environment*, 511 (2015), s. 298-308.
- LOWE, D. G. (1999): *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*. Computer Science Department, University of British Columbia. Vancouver, 8 s. [online:] <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>
- MCCABE, M. F. et al. (2017): *The future of Earth observation in hydrology*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, s. 3879-3914.

- MCPHILLIPS, L., WALTER, M. T. (2015): *Hydrologic conditions drive denitrification and greenhouse gas emissions in stormwater detention basins*. *Ecological Engineering*, 85(2015), s. 67-75.
- MENTLÍK, P. (2016): *Bohemian Forest: Landscape and People on the Frontier*. In: Pánek T., Hradecký, J. (eds.): *Landscape and Landforms of the Czech Republic*. *World Geomorphological Landscapes*. Springer, s. 87-99.
- METZGER, M. E. (2004): *Managing Mosquitoes in Stormwater Treatment Devices*. *Agriculture and Natural Resources*, University of California, 11 s. [online:] <https://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/8125.pdf>
- MZe (Ministerstvo zemědělství; 2015): *Sucho – vážná hrozba pro Českou republiku*, 23 s.
- MZe (Ministerstvo zemědělství; 2017): *Stručně o vodě v České republice*, 48s.
- MÍŘIJOVSKÝ, J., LANGHAMMER, J. (2015): *Multitemporal Monitoring of the Morphodynamics of a Mid-Mountain Stream Using UAS Photogrammetry*. *Remote sensing*, 7, 8586-8609. DOI: 10.3390/rs70708586
- NASCIMENTO, N.O. et al. (1999): *Using Detention Basins: Operational Experience and Lessons*. *Urban Water*, 1(1999), 113-124.
- NP Šumava. *Geologie* [online]. Citováno dne 13.11.2018, dostupné z: <http://www.npsumava.cz/cz/1263/sekce/geologie/>
- NP Šumava. *Mapa NP ochrana přírody* [online]. Citováno dne 15.6.2018., dostupné z: https://cz-np-sumava.tmapserver.cz/mapa/mapa_np_ochrana/
- PACIONE, M ed. (1999.): *Applied Geography: Principles and Practice*. Routledge, London and New York. 632 s, s. 99-100. ISBN 9780415214193
- PASSINI, R., WEAVER, W. (2017): *Accuracy analysis of DEMs generated from UAS imagery and large format digital cameras*. *Konference IGTF - ASPRS (2017)*, 7 s.
- PEARCE, F. (2001): *Dams and Floods* [online]. Citováno dne: 25.11.2017, dostupné z: <https://reliefweb.int/report/bangladesh/dams-accused-role-flooding-research-paper-dams-and-floods>
- Povodí Vltavy (2019): *Stavy a průtoky na vodních tocích*. <http://www.pvl.cz/portal/SaP/cz/pc/Mereni.aspx?id=VYMO&oid=1>

POJSL, V. (2017): *Návrh malé vodní nádrže na drobném vodním toku*. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno, 83 s.

Povodí Moravy. *Vodní nádrž* [online:]. Citováno dne 26.11.2017, dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodohospodarsky-slovník/vodni-nadrz/>

PRETEL, J., et al. (2011): *Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření (Technické shrnutí výsledků řešení projektu VaV SP/1a6/108/07 v letech 2007–2011)*.

Ministerstvo životního prostředí, 67 s. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_TECHNICKE_SHRNUTI_2011.pdf

Protrzenaprehrada.cz. *Bílá Desná, Jizerské hory*. Citováno dne 5.1.2019, dostupné z: <http://www.protrzenaprehrada.cz/>

REINHARDT, C., et al. (2011): *Decentralised water retention along the river channels in a mesoscale catchment in south-eastern Germany*. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7-8), s. 309-318.

SANTISE, M., FORLANI, G., RONCELLA, R. (2014): *Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery*. *ISPRS*, 40(5), s. 529-53.

SHAW, E. (1994): *Hydrology in Practice*. CRC Press, 3. vyd., 628 s.

SHINDE, P. S. (1997): *Multi-use of Stormwater Detention Ponds in Parks and Open Spaces*. Diplomová práce, University of Georgia. 99 s.

Správa NP Šumava (2012): *Rozbory Chráněné krajinné oblasti Šumava*. 102 s.

STONE, R. (2009): *Divining Angkor*. *National Geographic magazine*. [online:] <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2009/07/divining-angkor/>

SCHOLY, M., SADOWSKI, A.J. (2009): *Conceptual classification model for sustainable flood retention basins*. *J. Environ. Manage.* 90, 624–633. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.12.018>.

SKŘEHOT, P. (2006): *Naučte se číst ze synoptické mapy*. [online:] <http://www.astronomie.cz/ke-stazeni/>

SOONG, T., MURPHY E. A., STRAUB, T. D. (2009): *Effect of Detention Basin Release Rates on Flood Flows—Application of a Model to the Blackberry Creek Watershed in Kane County, Illinois*. Scientific Investigations Report 2009–5106. Reston, Virginia, 44 s.

Sumavanet. Plavební nádrže - klauzy [online]. Citováno dne 18.1.2019, dostupné na: <https://www.sumavanet.cz/modrava/default.asp>

SVERDRUP, K. A., ARMBRUST, E. V. (2009): *An introduction to the world's oceans*. McGraw-Hill Education, 10. vyd., 528 s. ISBN: 0-07-337670-1

ŠMRHOVÁ, Z. (2014): *Vliv malých vodních nádrží na výskyt extrémních odtokových epizod v povodí horní Otavy*. Diplomová práce, PŘF UK, Praha, 121 s.

TAUFMANNOVÁ, A., JENÍČEK, M. (2011): *Impact of Polder System on Flooding in the Rolava River Basin*. Geografie, 116(2), s.130-143.

TOLASZ, R. et al. (2007): *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Český hydrometeorologický ústav. Praha, 1. vyd., 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1.

ULLMAN, S. (1979): *The Interpretation of Structure from Motion*. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, s. 405-426.

USGS (2016): *How much water is there on, in, and above the Earth?* The USGS Water Science School. [online:] <https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>

ÚCL (Úřad pro civilní letectví; 2017): Předpis L2, Doplněk X – Bezpilotní systémy, 6 s. 2. [online:] <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>

VACKOVÁ, T. (2016): *Využití UAV pro mapování a analýzu následku povodní*. Diplomová práce, PŘF UK, Praha, 87 s.

VLČEK, L., et al. (2012): *Retenční potenciál a hydrologická bilance horského vrchoviště: Přípravová studie Rokytecké Slatě, povodí Horní Otavy, JZ. Česko*. Geografie, 117, č. 4, 395-405.

VLČEK, L., et al. (2016): *Influence of peat soils on runoff process: case study of Vydra River headwaters, Czechia*. Geografie, 121, č. 2, s. 235-253.

VOROGUSHYN, S. et al. (2012): *Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel-dike-floodplain system along the river Elbe, Germany*. Journal of Hydrology, 436-437 (2012), s. 120-131.

VÚMOP. *Půda v mapách* [online]. Citováno dne 1.3.2018, dostupné z:
<https://mapy.vumop.cz/>

VÚV TGM. *DIBAVOD* [online]. Citováno dne 21.2.2018, dostupné z:
<http://www.dibavod.cz/17/geodatabase-dibavod.html>

WISNER, B., et al (2004): *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*.
Routledge, New York, 2. vyd., 496 s. ISBN 978-0415252164

YANG, Q., et al. (2011): *Feature selection methods for characterizing and classifying
adaptive Sustainable Flood Retention Basins*. *Water Res.*, 45(3), s. 993–1004. DOI:
10.1016/j.watres.2010.10.006

ZAHRADNÍK, P. (2015): *Historie kůrovcové kalamity na Šumavě a její možné dopady na
budoucí vývoj*. Zima 2015, s. 8–9. [online:] [http://www.npsumava.cz/gallery/31/9433-
zahradnik.pdf](http://www.npsumava.cz/gallery/31/9433-zahradnik.pdf)

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1.1	6
Obrázek 1.2	8
Obrázek 2.1	13
Obrázek 2.2	17
Obrázek 2.3	23
Obrázek 2.4	24
Obrázek 4.1	29
Obrázek 4.2	30
Obrázek 4.3	38
Obrázek 5.1	45
Obrázek 5.2	46
Obrázek 5.3	49
Obrázek 6.1	51
Obrázek 7.1	54
Obrázek 7.2	56
Obrázek 7.3	58
Obrázek 7.4	59
Obrázek 7.5	62
Obrázek 7.6	63
Obrázek 7.7	69
Obrázek 7.8	70
Obrázek 8.1	71
Obrázek 8.2	75
Obrázek 8.3:	80
Tabulka 2.2	20
Tabulka 2.3	21
Tabulka 4.1	27
Tabulka 4.2	34
Tabulka 4.3	41
Tabulka 5.1	47
Tabulka 5.2	48
Tabulka 7.1	65
Tabulka 7.2	65
Tabulka 7.3	66
Tabulka 7.1	76
Graf 2.2	22
Graf 7.1	74
Graf 7.2	76
Graf 7.3	77

Použité zkratky

2D – dvojdimenzionální

3D – trojdimenzionální

BPEJ – bonitovaná půdně ekologická jednotka

ČHMÚ – Český hydrometeorologický úřad

DMP – Digitální model povrchu

DMR4G – Digitální model reliéfu 4. generace

DMR5G – Digitální model reliéfu 5. generace

DronDEM – akronym představující digitální elevační model vytvořený technikou Structure from Motion užitím bezpilotního letadla, resp. dronu

EIA – Environmental Impact Assessment (Vyhodnocení vlivů na životní prostředí)

EVL – Evropsky významná lokalita

GAČR – Grantová agentura České republiky

GCP – ground control points (pozemní kontrolní body)

CHKO – chráněná krajinná oblast

IPCC – International Panel for Climate Change

MVN – malé vodní nádrže

MZCHÚ – maloplošná zvláště chráněná území

NP – národní park

PřF UK – Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

SfM – Structure from Motion

UAV – Unmanned Aerial Vehicle (zkr. pro bezpilotní letadlo)

ÚCL – Úřad pro civilní letectví

VBP – výškové bodové pole

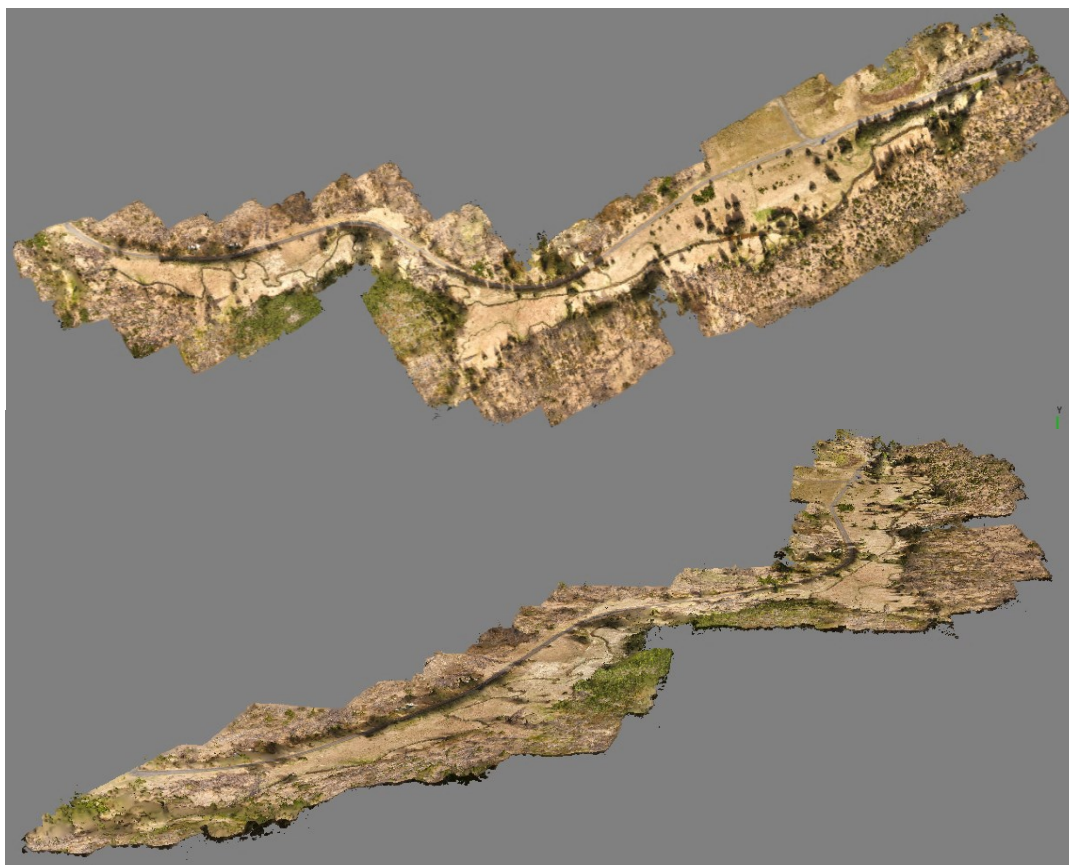
VZCHÚ – velkoplošná zvláště chráněná území

Přílohy

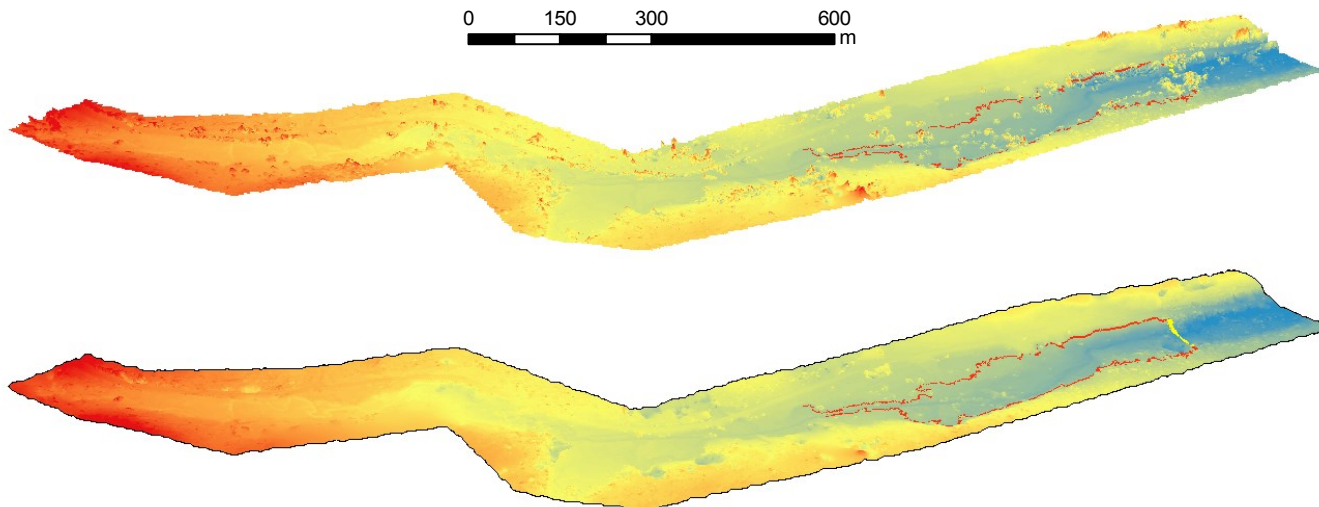
Příloha 1: Texturované 3D modely povrchu, DMP a DEM zaniklých plavebních nádrží.

Červená linie v DMP a DEM znázorňuje hranici zádržného prostoru, černá linie znázorňuje hráz, žlutá linie znázorňuje chybějící hráz,

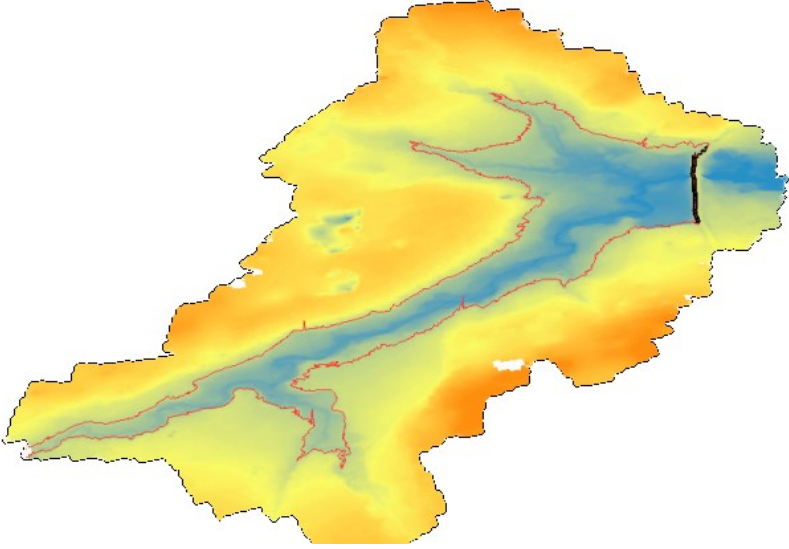
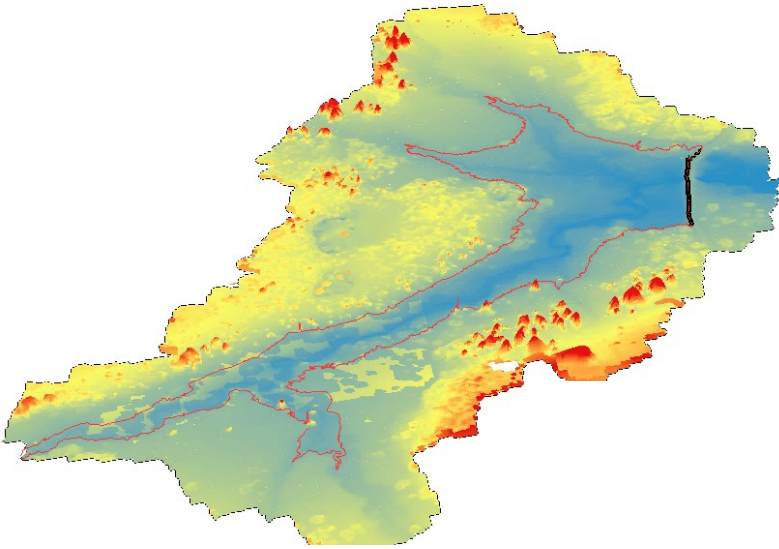
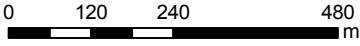
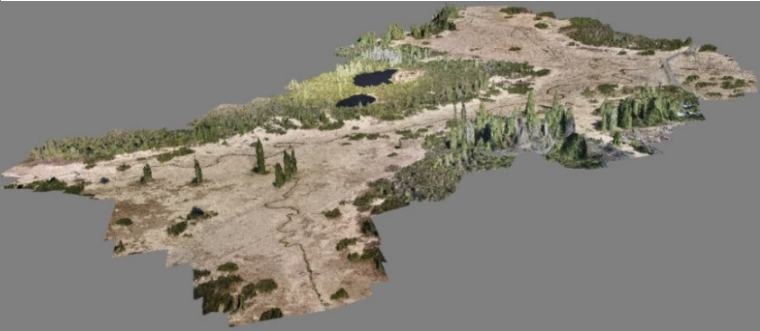
Javoří



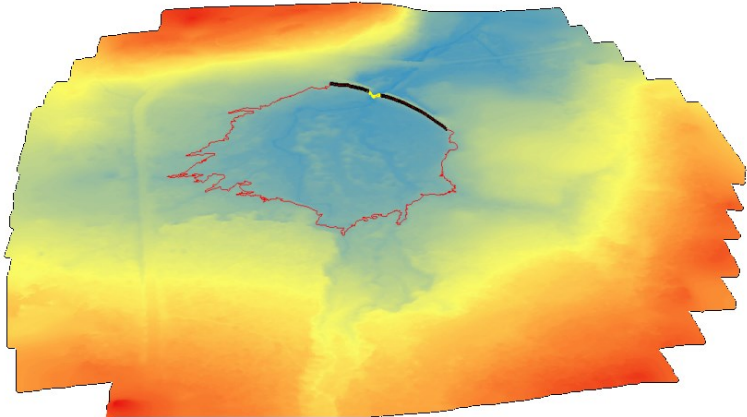
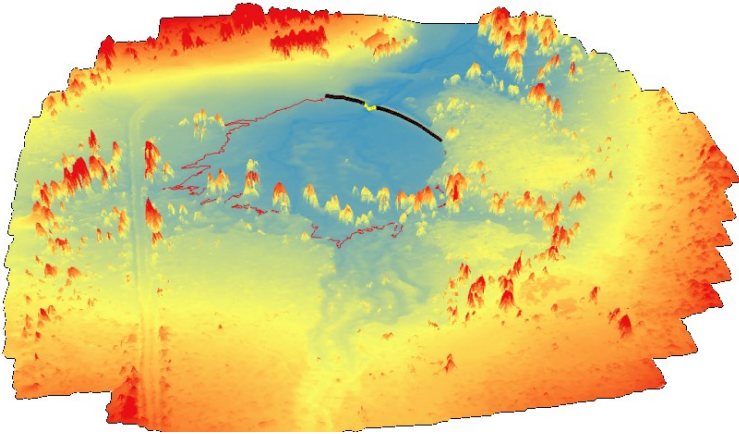
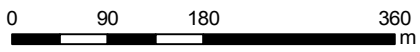
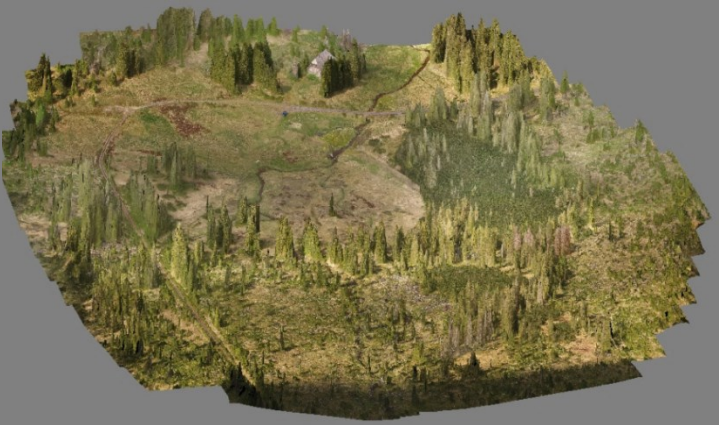
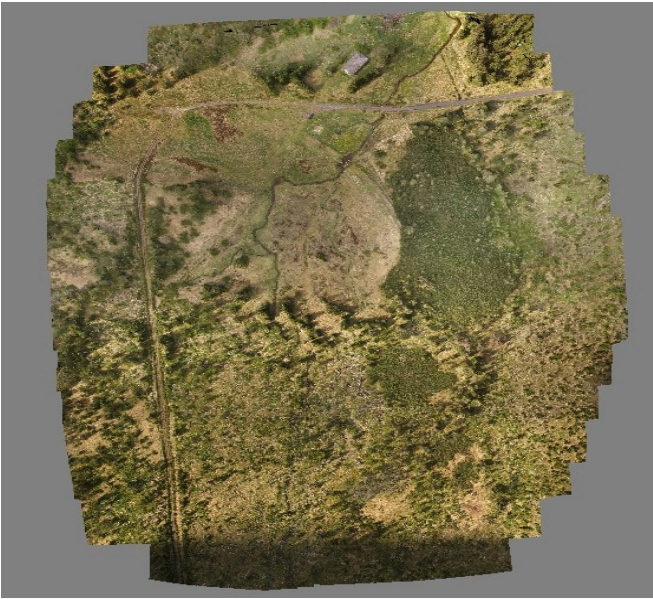
0 150 300 600
m



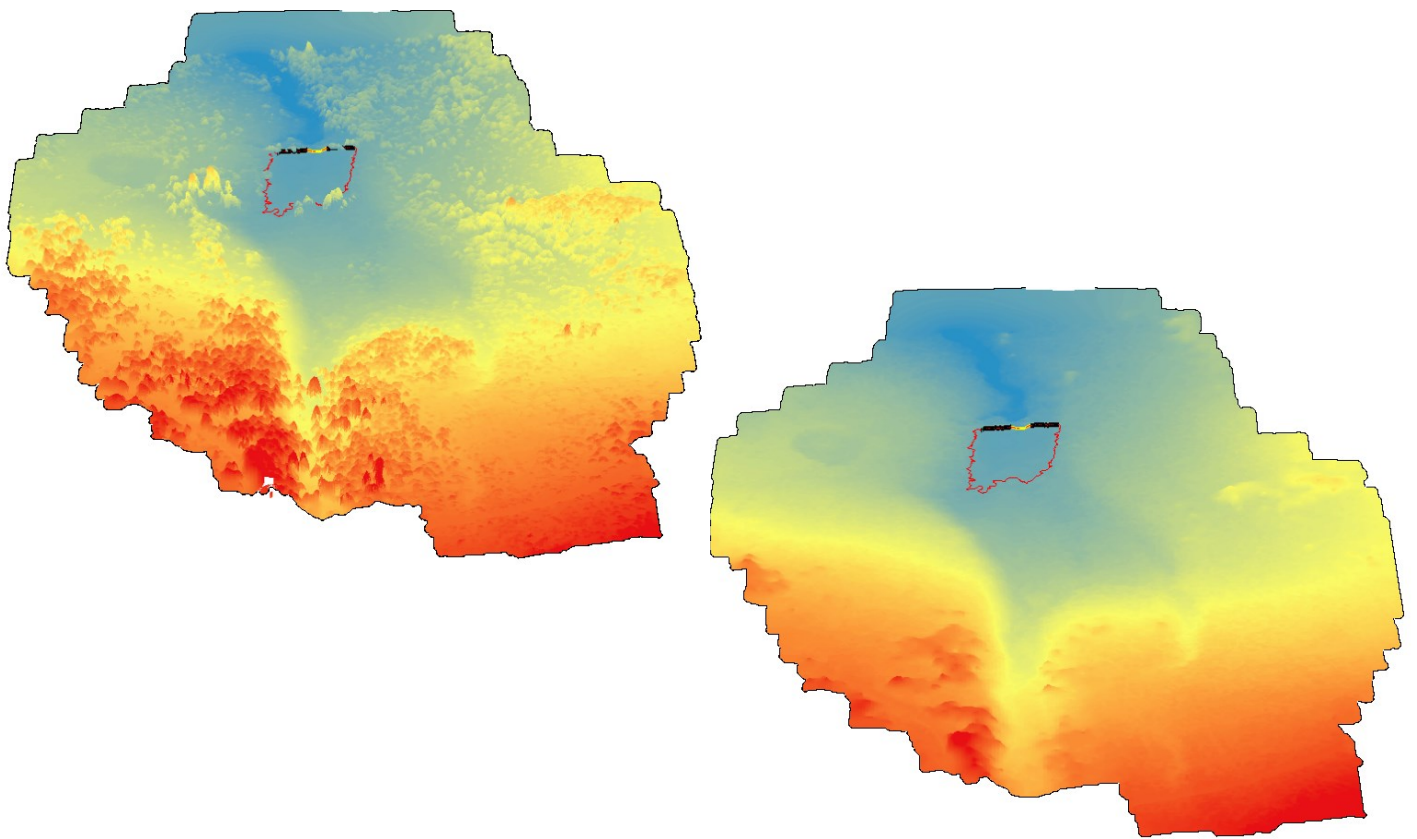
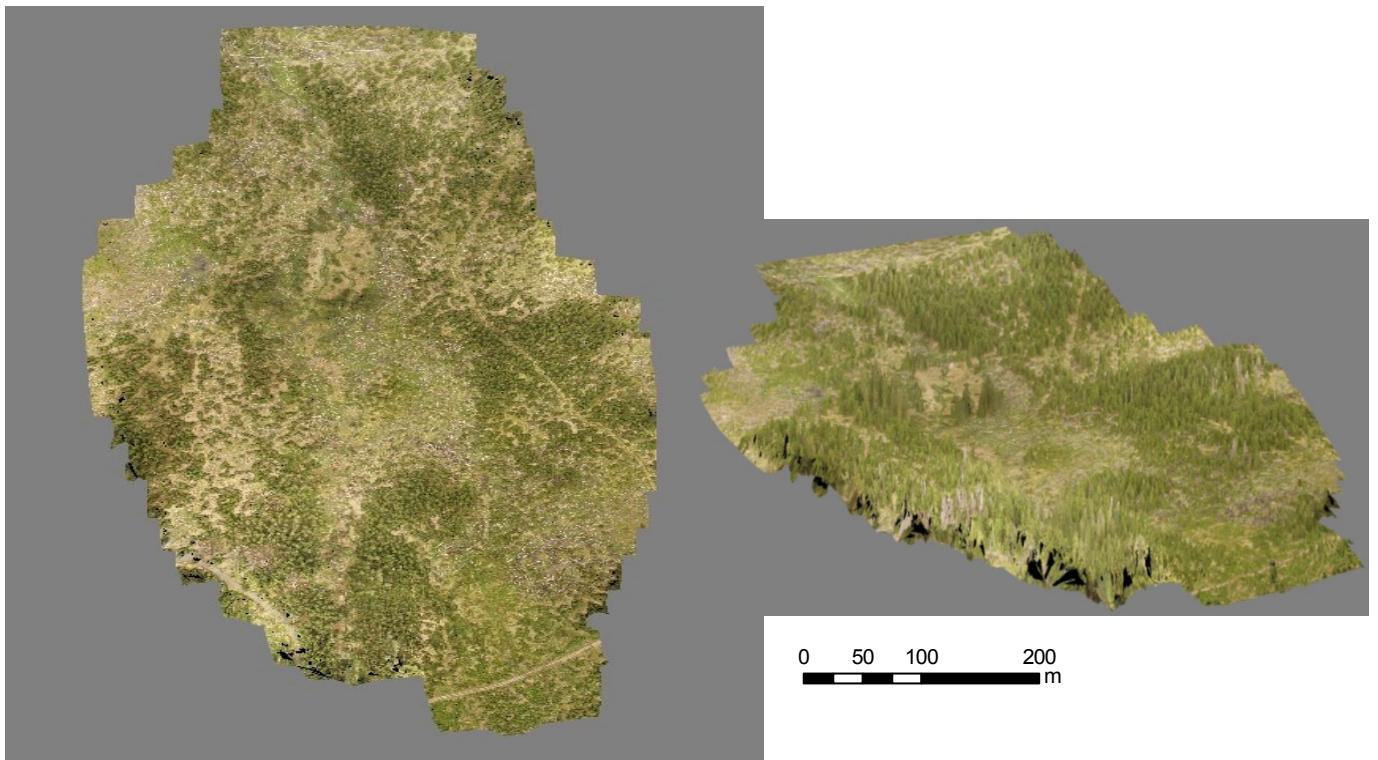
Rokytká



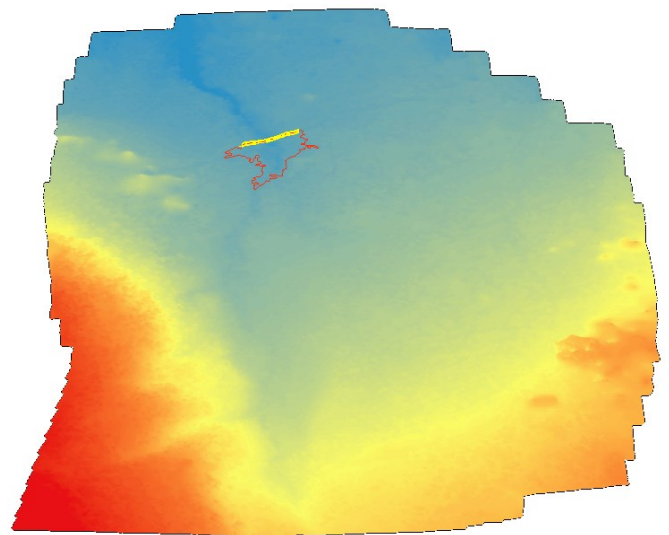
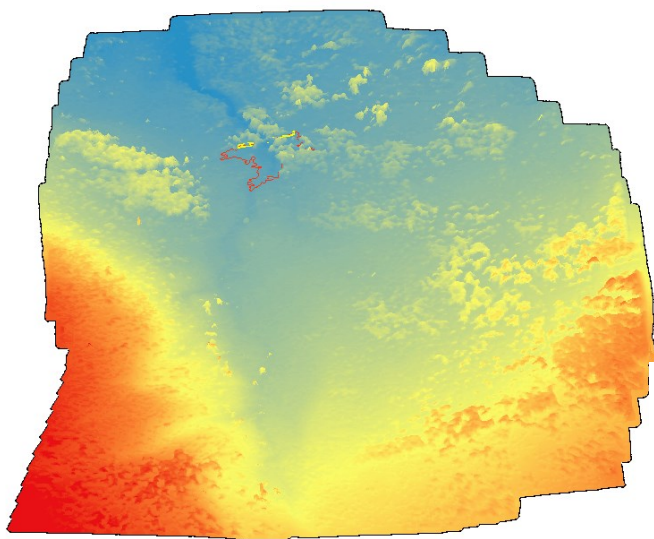
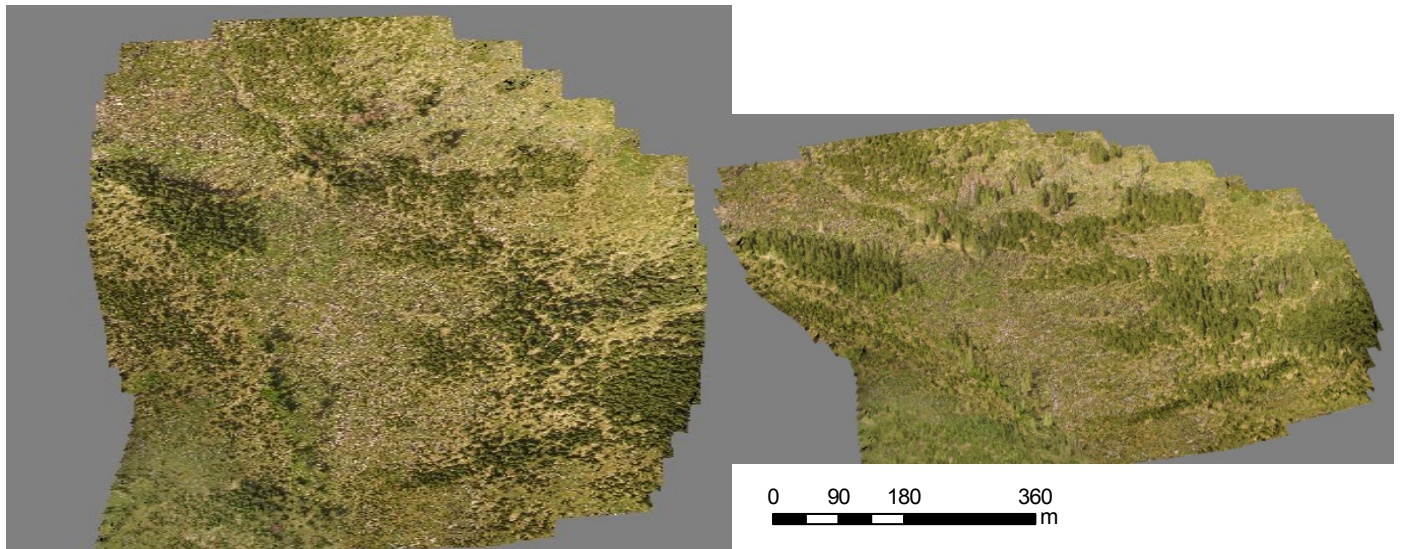
Roklanská



Novohuťská

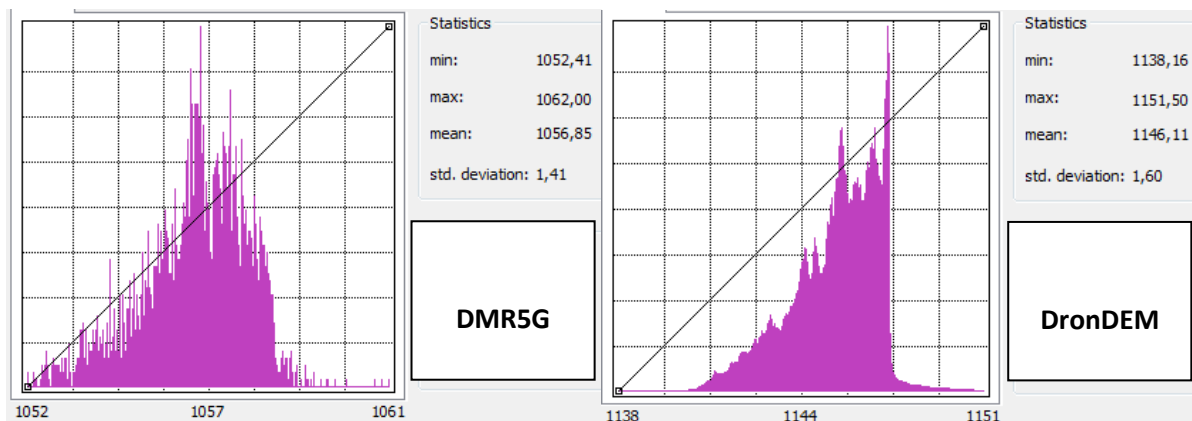


Studená

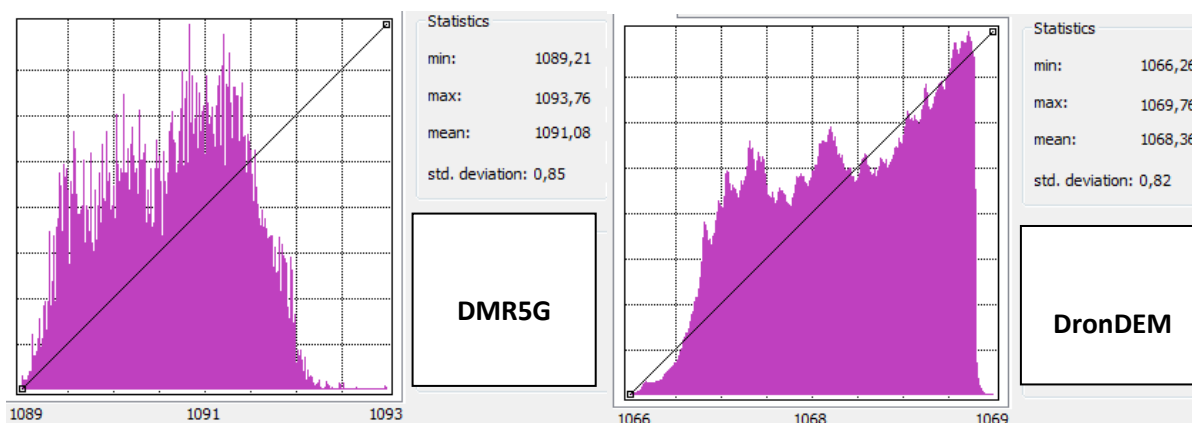


Příloha 2: Histogramy absolutních četností (osa Y) zastoupených nadmořských výšek (osa X) pro všechny modely nádrží před procesem výškopisné korekce a odstranění chybně klasifikovaných maximálních a minimálních nadmořských výšek (nízké zastoupení četností v levých i pravých částech histogramů u DronDEM).

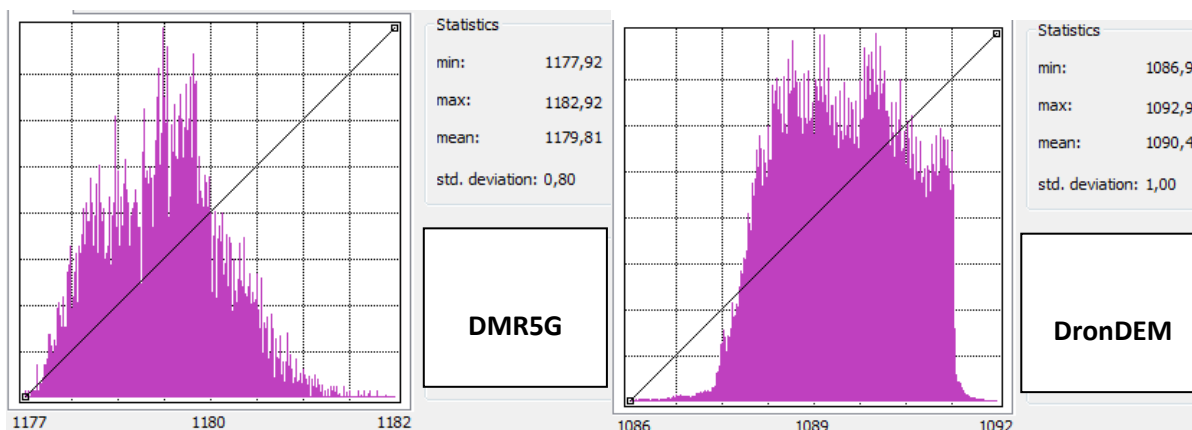
Javoří



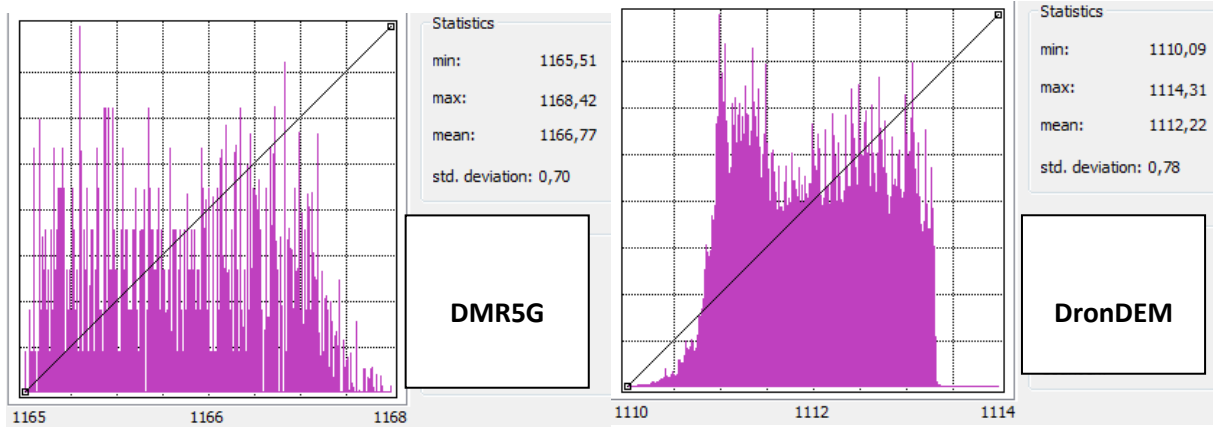
Rokytká



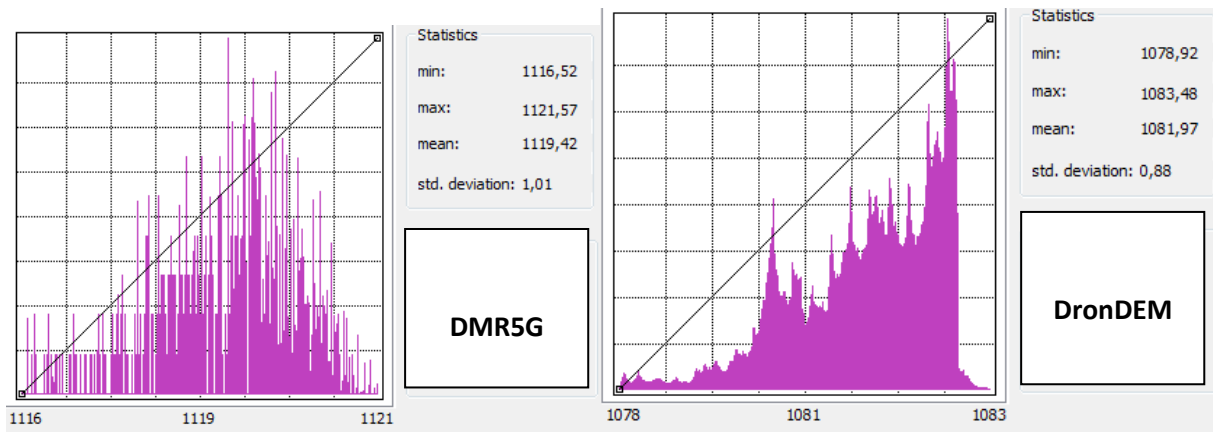
Roklanská



Novohuťská

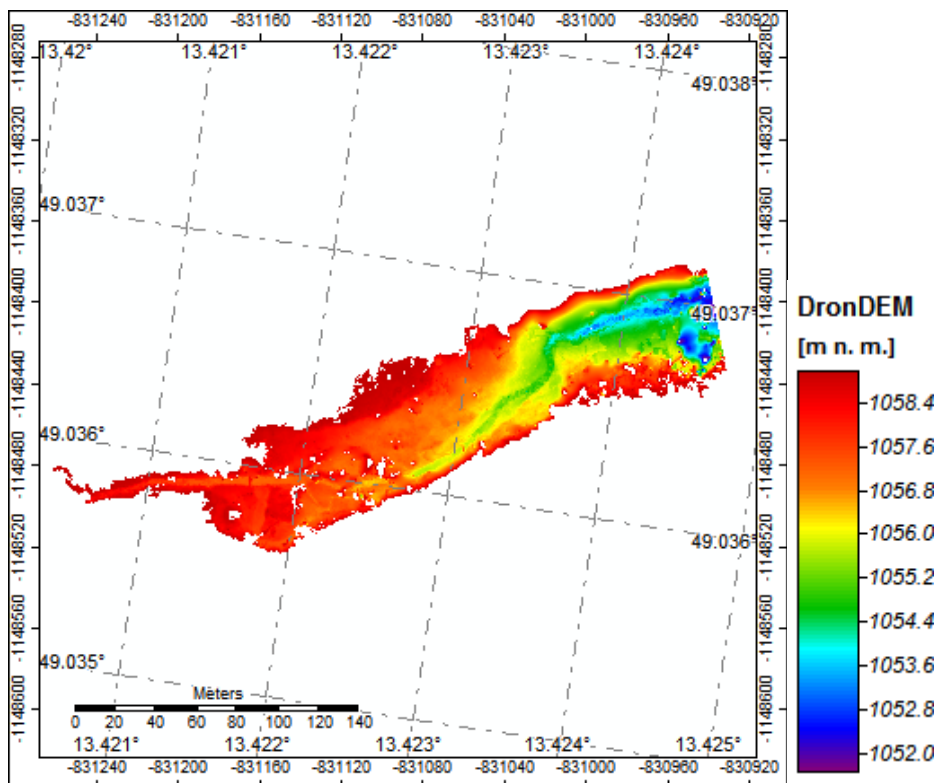
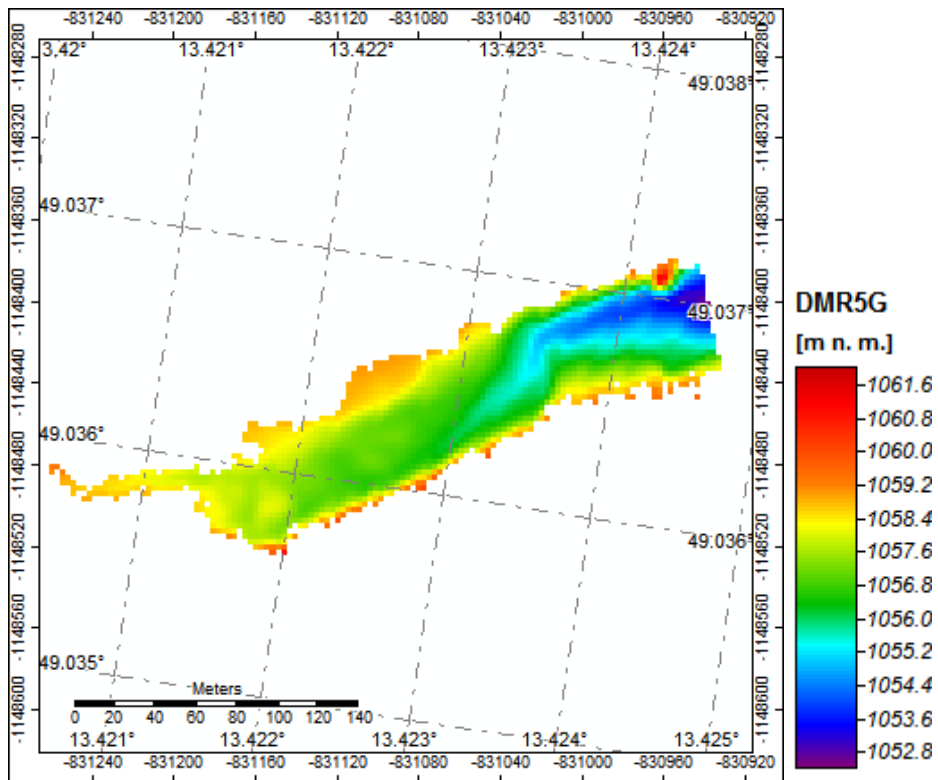


Studená

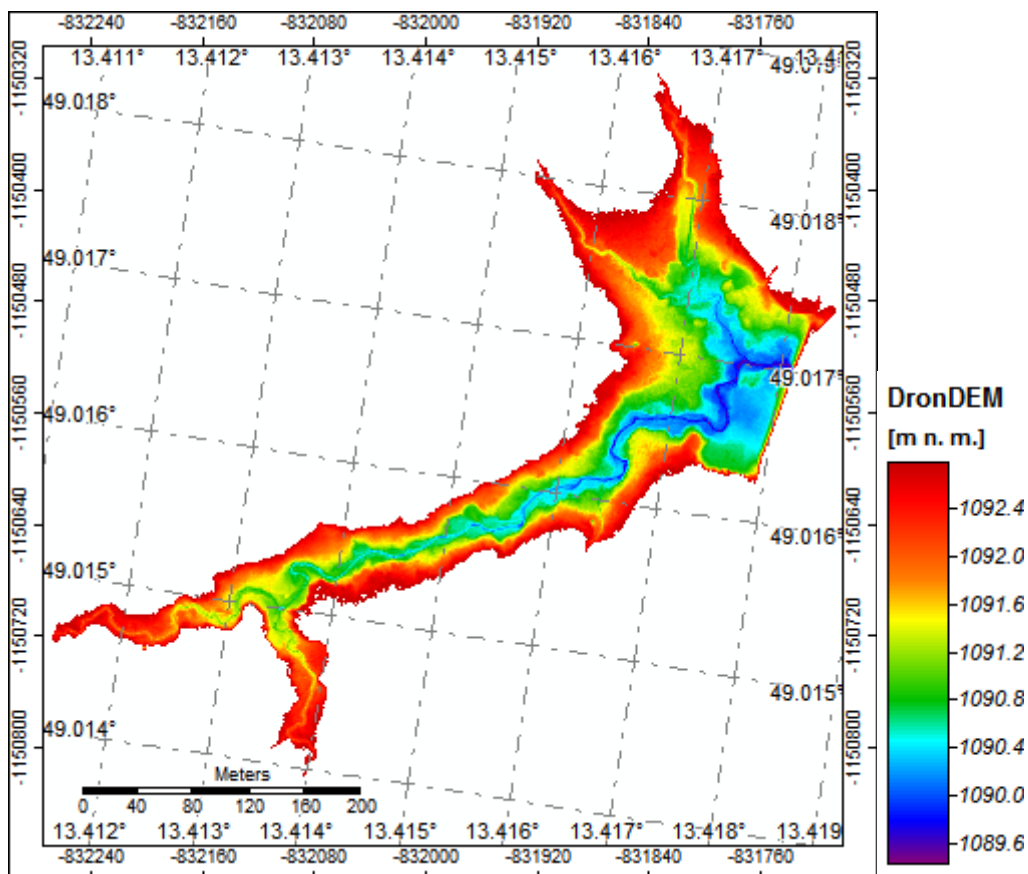
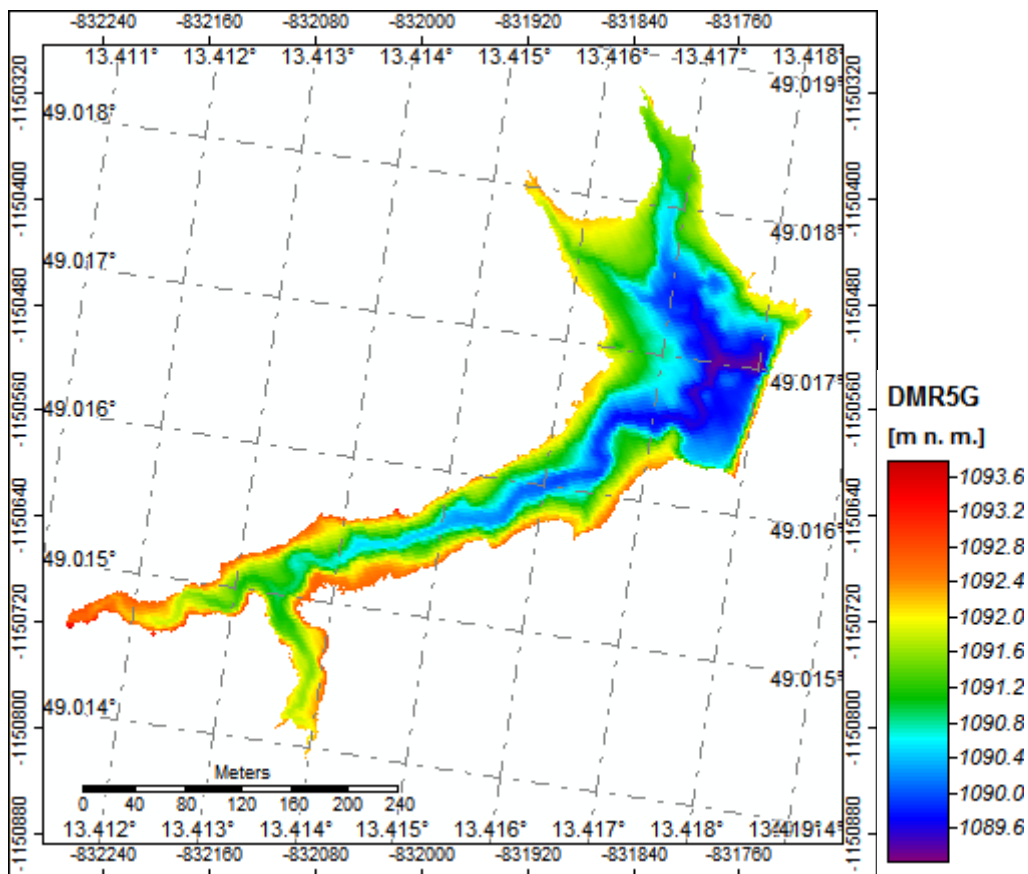


Příloha 3: Porovnání konečné podoby korigovaných DEM nádrží vytvořených skrze fotogrammetrické zpracování snímků získaných z UAV metod (DronDEM) a DMR5G.

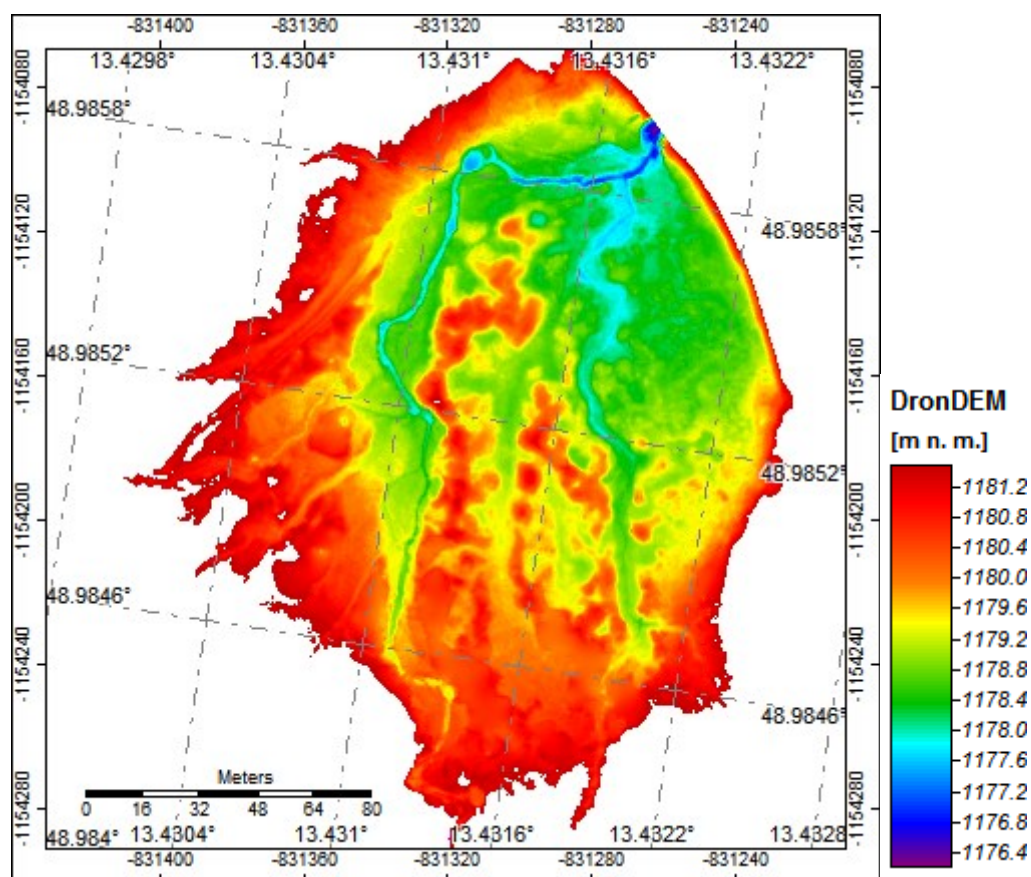
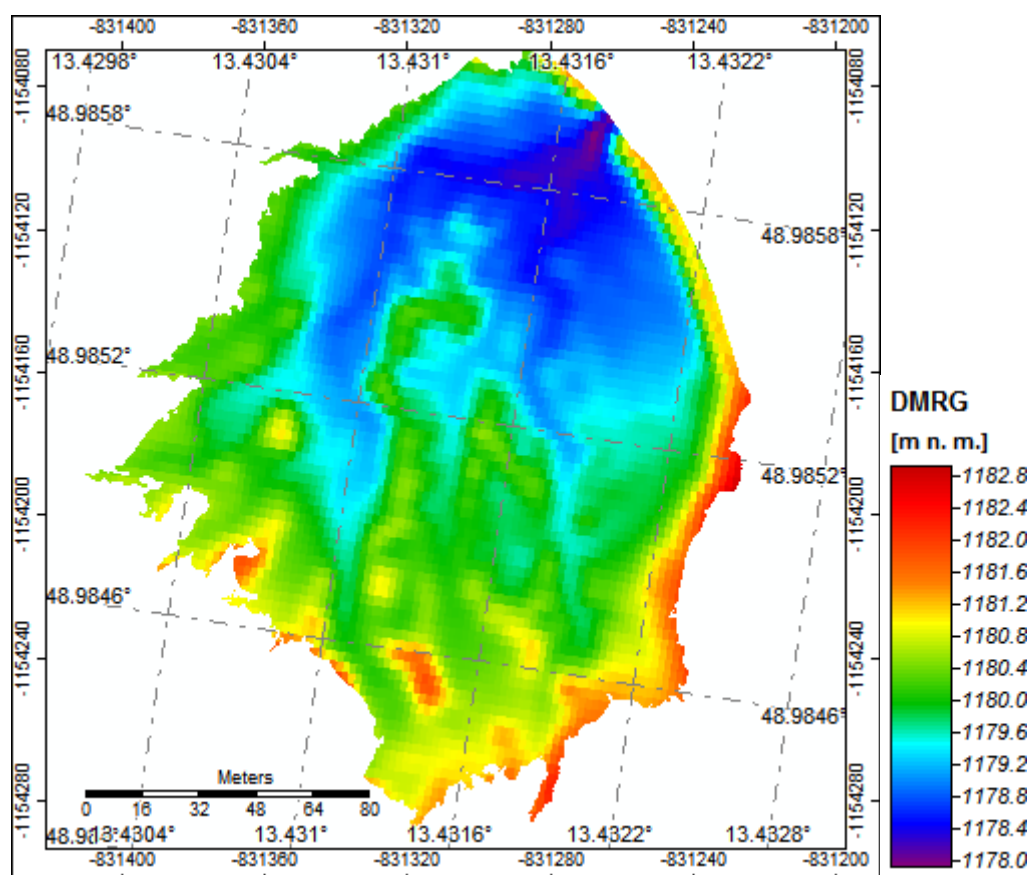
Javoří



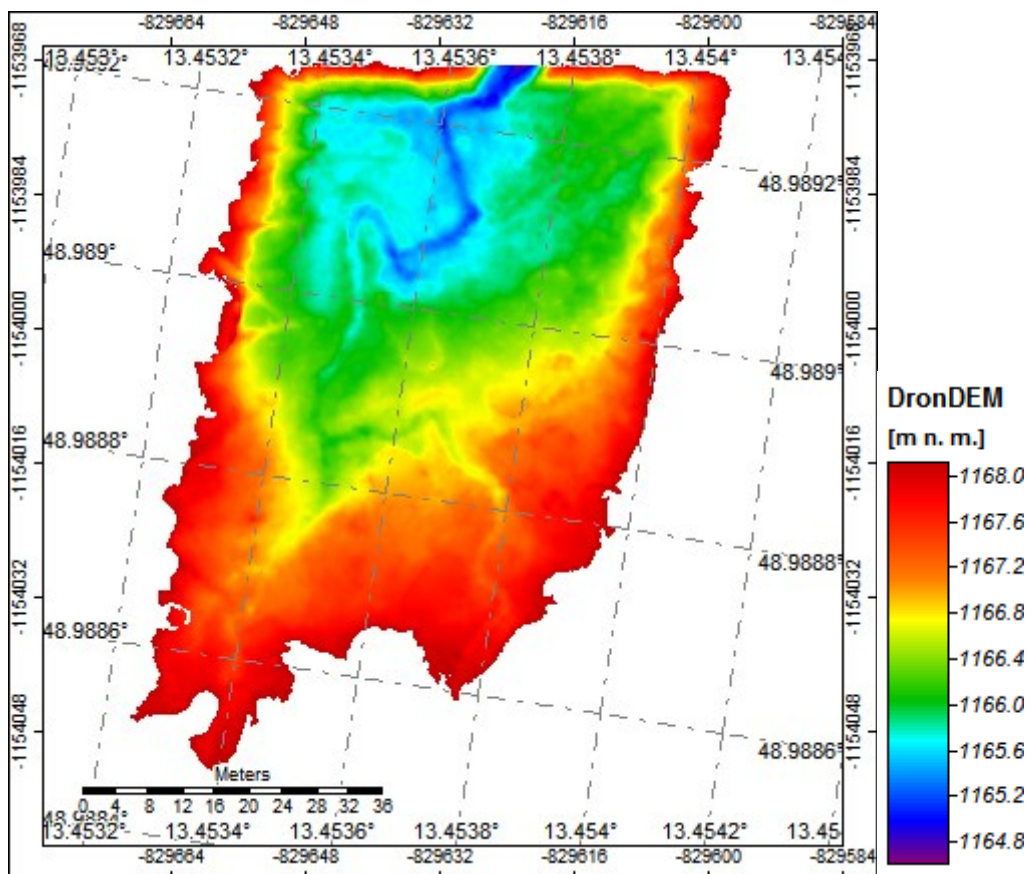
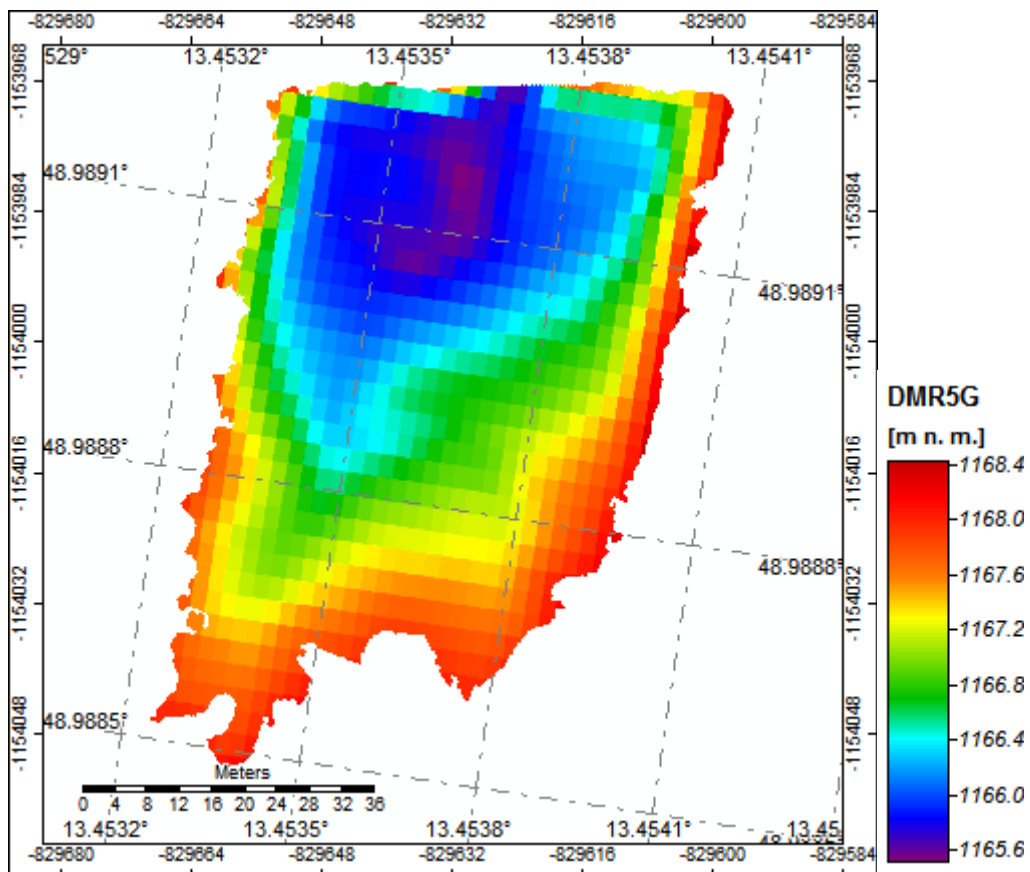
Rokytká



Roklanská



Novohuťská



Studená

