

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING



**Rekonstrukce krajiny v oblasti vodních nádrží
pohledem geoinformatika**

**Landscape reconstruction in the water
reservoir area from the perspective of a
geoinformatician**

doc. Ing. Jan Pacina, Ph.D.

Summary

The surrounding landscape is changing every moment, with humans being the biggest driver of change over the last century. Thanks to modern geoinformatics methods, we are able to identify, record, analyse and exploit these changes in various fields of human knowledge.

This presentation focuses on landscape reconstruction in the reservoir region. The landscape changes that take place beneath the water surface remain hidden to the eye in many cases but can have a major impact on the environment and other aspects of human lives. Landscape reconstruction can be viewed from many angles - in this presentation we will look at this issue through the eyes of a geoinformatician.

The lecture will introduce source data and methods that can be used for landscape reconstruction. Emphasis is placed on reconstructing pre-dam topography using archival aerial imagery, old maps, and documenting the current state of relief below the water surface using bathymetric and topographic mapping. The lecture also includes an introduction to the difficulties in using these methods.

Case studies are then presented to illustrate the application of geoinformatic methods of landscape reconstruction within reservoirs to the field of fluvial geomorphology, with a focus on monitoring reservoir bed dynamics and history with an emphasis on the preservation and presentation of extinct cultural heritage.

Souhrn

Okolní krajina se mění každým okamžikem, přičemž největším hybatelem změn je v posledním století člověk. Díky moderním metodám geoinformatiky jsme schopni tyto změny identifikovat, zaznamenávat, analyzovat a využívat získané znalosti v různých oblastech lidského vědění.

Tato přednáška se věnuje rekonstrukci krajiny v oblasti vodních nádrží. Změny krajiny, které pod vodní hladinou probíhají, zůstávají v mnoha případech očím skryté, mohou však mít velký vliv na životní prostředí a další aspekty lidských životů. Na rekonstrukci krajiny můžeme nahlížet z mnoha úhlů – v rámci přednášky na tuto problematiku budeme pohlížet očima geoinformatika.

V průběhu přednášky budou představena zdrojová data a metody, která mohou být použita pro rekonstrukci krajiny. Důraz je kladen na rekonstrukci před-přehradní topografie s využitím archivních leteckých měřických snímků, starých map a dokumentace aktuálního stavu reliéfu pod vodní hladinou s využitím batymetrického a topografického mapování. Součástí přednášky je také představení úskalí při využívání těchto metod.

Případové studie jsou následně ukázkou aplikace geoinformatických metod rekonstrukce krajiny v rámci vodních nádrží do oblasti fluvialní geomorfologie se zaměřením na sledování dynamiky dna vodních nádrží a historie s akcentem na uchování a prezentaci zaniklého kulturního dědictví.

Klíčová slova

Rekonstrukce krajiny; vodní nádrže; před-přehradní topografie; staré mapy; letecké snímky; batymetrie; topografické mapování.

Key words

Landscape reconstruction; water reservoirs; pre-dam topography; old maps; aerial photographs; bathymetry; topographic mapping.

Obsah

1.	Úvod a motivace.....	6
1.1.	Proč je potřeba provádět rekonstrukci krajiny v oblasti vodních nádrží?	6
2.	Přístupy k rekonstrukci krajiny.....	7
2.1.	Rekonstrukce krajinného krytu.....	8
2.2.	Rekonstrukce reliéfu.....	8
3.	Archivní letecké snímky	9
3.1.	Zpracování archivních LMS.....	10
4.	Staré mapy a rekonstrukce reliéfu	14
4.1.	Postup zpracování starých map	16
4.2.	Problematické aspekty využití starých map při rekonstrukci před-přehradního reliéfu	18
4.3.	Ověření kvality výškopisu použitých archivních map....	22
5.	Metody mapování dna vodních nádrží	25
5.1.	Využití metod dálkového průzkumu Země v rámci vodních nádrží	27
5.2.	Rekonstrukce dna na základě měřených dat.....	28
5.3.	Ověření kvality měřených dat.....	29
6.	Případové studie – rekonstrukce dna vodních nádrží	31
6.1.	Vodní nádrž Nechanice – vývoj nátokové delty	31
6.2.	Vodní nádrž Skalka – dynamika dna horní části nádrže.	34
6.3.	Rekonstrukce původního údolí řeky Vltavy	36
	Závěr	40
	Literatura	42

1. Úvod a motivace

Změny krajiny jsou součástí našeho každodenního života. Přirozené změny krajiny přetvářejí náš okolní svět ve většině případů pozvolně a nenápadně, přičemž události, které mají vliv na rozsáhlé a náhlé změny krajiny, zejména přírodní pohromy, nejsou v našich geografických podmínkách příliš časté. Na druhou stranu existují rozsáhlé změny krajiny způsobené lidskou činností, které dramaticky změnily nejen okolní strukturu či tvar krajiny, ale v mnoha ohledech ovlivnily i lidské životy. V našich podmínkách se jedná především o změny krajiny způsobené průmyslovou činností, těžbou, či výstavbou vodních nádrží.

Na změny krajiny můžeme nahlížet z různých úhlů a s využitím mnoha vědních oborů. Účelem této přednášky je prezentovat rekonstrukci zaniklé i současné krajiny v oblastech vodních nádrží pohledem geoinformatika. V přednášce budou prezentovány možné přístupy k rekonstrukci tzv. před-přehradní topografie s využitím archivních dat, dále budou popsány klasické i méně klasické metody sběru prostorových dat, které se využívají pro rekonstrukci současného stavu podvodní topografie. Na základě takto získaných dat je možné provádět navazující analýzy, případně 3D vizualizace.

1.1. Proč je potřeba provádět rekonstrukci krajiny v oblasti vodních nádrží?

Okolní krajina se mění také tam, kde to není na první pohled patrné. K velkým změnám dochází právě na dnech vybudovaných vodních nádrží. Zde dochází k akumulaci materiálu transportovaného vodou, zanášení původních koryt řek, abrazi břehů a v ojedinělých případech také k destrukci prvků, které byly vybudovány lidmi před stavbou přehrady.

V České republice ale i ve světě v minulosti vznikla celá řada vodních nádrží, přičemž v krajině plní důležité funkce:

- mohou sloužit jako zásobárny pitné (případně průmyslové) vody,
- v mnoha případech jsou vodní nádrže využívány jako ochrana před povodňovými jevy (např. Vltavská kaskáda) a zároveň plní funkci pro volnočasové využití,

- ekologicky šetrná výroba elektrické energie,

Známě jsou však i negativní dopady, které vodní nádrže v krajině přinášejí. Patří mezi ně např.

- změna ve využívání krajiny (destrukce sídel, přesídlení obyvatel, zaplavení orné půdy) [7],
- zanášení nádrží sedimentem (snížení retenční schopnosti) [27],
- usazování kontaminantů (těžké kovy, chemikálie, rezidua léčiv) [1],
- hrozba uvolnění kontaminantů při manipulaci se sedimentem a jejich následný transport níže po proudu (tzv. flush-out efekt) [4].

Při studiu těchto dopadů v rámci vodních nádrží je vhodné (a v mnoha případech klíčové) využívat nástrojů geoinformatiky. Geoinformatické metody pro rekonstrukci zaniklé krajiny jsou v dnešní době běžně využívanou praxí [7] – nicméně při aplikaci těchto „standardních“ metod při rekonstrukci před-přehradní i současné krajiny (topografie) v oblasti vodních nádrží jsme se setkali se specifickými omezeními, která budou představena v podkapitole 4.2.

Přesídlení původních obyvatel a zaplavení krajiny vodou úzce souvisí se ztrátou "paměti krajiny" a kulturního dědictví (tj. zničených nebo zaplavených kostelů, hřbitovů a významných krajinných prvků). Rekonstrukce krajiny na základě dostupných historických a prostorových archivních dat s využitím moderních geoinformatických metod je důležitým krokem k zachování "paměti krajiny" a kulturního dědictví pro budoucí generace [29]. Část přednášky je věnována 3D rekonstrukci původního údolí řeky Vltavy.

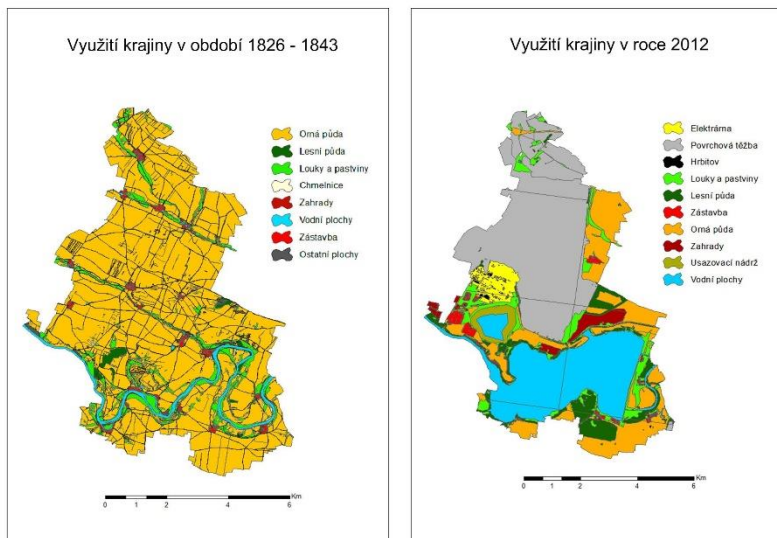
2. Přístupy k rekonstrukci krajiny

Na rekonstrukci krajiny s využitím prostorových dat a metod geoinformatiky můžeme nahlížet dvěma způsoby:

1. rekonstrukce věnované změnám krajinného krytu,
2. rekonstrukce zaměřená na odvození topografie (reliéfu).

2.1. Rekonstrukce krajinného krytu

Původní krajinu (resp. krajinný kryt) lze rekonstruovat na základě topografických informací obsažených ve zpracovaných starých mapách nebo archivních leteckých snímcích [6], [28]. Princip zpracování je představen v kapitole 9. Princip rekonstrukce krajinného krytu ve většině případů spočívá ve vektorizaci (interpretaci) zpracovaných dat do připravené vektorové datové struktury. Ukázka rekonstrukce krajinného krytu v oblasti vodní nádrže Nechranice s využitím starých map je prezentována na Obr. 1.



Obr. 1 Rekonstrukce krajinného krytu v oblasti vodní nádrže Nechranice na základě Povinných císařských otisků stabilního katastru (vlevo) a topografické mapy z roku 2012 (vpravo).

2.2. Rekonstrukce reliéfu

Rekonstrukci reliéfu v oblasti vodní nádrže můžeme provádět za účelem:

1. odvození před-přehradní topografie (reliéfu),
2. tvorby digitálního modelu reliéfu (DMR) současného dna.

V prvním případě jsou využívány výškopisné informace obsažené v archivních zdrojích prostorových dat. Vhodné zdroje dat použité pro rekonstrukci georeliéfu představují staré mapy obsahující výškopisné informace v podobě vrstevnic (a výškových bodů), nebo archivní letecké snímky s dostatečným překrytem [23, 24].

Rekonstruovaný před-přehradní reliéf se využívá k následným analýzám a vizualizacím, při nichž jsou vyžadována přesná data. Jedná se zejména o určení mocnosti sedimentu, která je určena jako rozdíl dvou (či více) časových řad zpracovaných DMR – jedna z vrstev je původní (před-přehradní reliéf) a druhá odvozená z přímých měření v rámci vodní nádrže. V případě nepřesných vstupních dat je tato chyba přenášena do výpočtu mocnosti sedimentu. Proto je zapotřebí využívat datové zdroje z co možná největší přesností [10].

Současný tvar dna vodní nádrže je možný rekonstruovat na základě dat získaných pomocí batymetrického mapování, případně jiných metod topografického mapování [17]. Metody, jejich možnosti a dosažené přesnosti jsou prezentovány v kapitole 5.

3. Archivní letecké snímky

V České republice bylo první použití letecké fotogrammetrie zdokumentováno v Zeměměřičském věstníku v roce 1932. Od roku 1936 bylo v Československu zahájeno periodické fotogrammetrické snímkování. Nezpracované archivní letecké měřické snímky spravuje "Vojenský zeměpisný a hydrometeorologický ústav v Dobrušce" (VGHMÚř), případně "Český úřad zeměměřický a katastrální" (ČÚZK). Požadované letecké měřické snímky (LMS) lze získat ve formě profesionálně naskenovaných digitálních kopií a některé časové řady zpracované do podoby ortofot jsou dostupné jako online mapové vrstvy v prostředí Geoportálu ČÚZK a Národního geoportálu INSPIRE. Velká část bývalého Československa byla fotogrammetricky snímkována v roce 1938 a téměř celé území dnešní České republiky bylo snímkováno v letech 1947-1954. Archivní snímky představují v současné době běžný archivní zdroj, který se používá pro analýzu změn krajinného krytu.

Archivní LMS, s ohledem na 60% podélný a 30% příčný překryv, umožňují s využitím metod fotogrammetrie, odvození digitálního modelu povrchu (DMP). Rekonstrukce výškopisu s využitím archivních LMS byla popsána ve světové literatuře [24], [26]. DMP odvozený z archivních LMS v oblasti z antropogenně změněnou krajinou v rámci ČR byl prezentován v [20].

Kvalitu DSM odvozených z českých archivních leteckých snímků byla analyzována v [21]. Dvě datové sady leteckých snímků z let 1938 a 1953 byly zpracovány pomocí metod standardní fotogrammetrie a Structure from Motion (SfM) modelování [33]. Výsledný DSM byl porovnán s etalonovými body zaměřenými pomocí RTK GPS. Výsledky ukázaly, že modelování SfM (v tomto případě byl použit program Agisoft Metashape) je vhodnější metodou pro zpracování archivních leteckých fotografií dostupných v českých archivech.

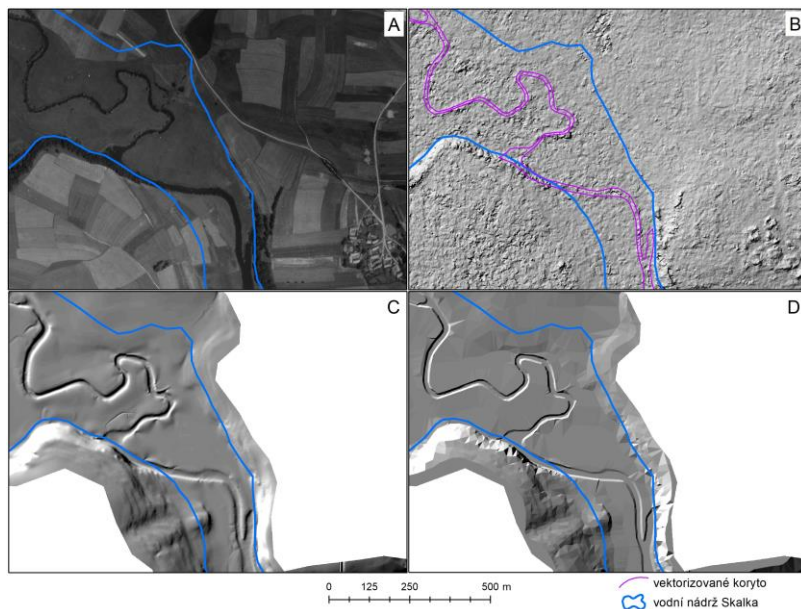
S ohledem na výše uvedené informace, kdy je celé území ČR pokryto archivními LMS z různých let, byla otestovaná metodika zpracování, provedeny pilotní studie (nehledě na zpracované archivní ortofota na serveru ČÚZK), tak připadají archivní LMS jako vhodný datový zdroj pro rekonstrukci reliéfu v oblasti vodních nádrží. Jednotlivé LMS pokrývají (v závislosti na měřítku) relativně rozsáhlé oblasti, pro zpracování bloku LMS je zapotřebí jen určitý počet pozemních vlícovacích bodů (GCP) a zpracování s využitím algoritmů SfM je intuitivní a v (závislosti na použitém hardware) rychlé.

V rámci zpracování byly však zjištěny mnohé problematické aspekty, které výrazně snižují kvalitu odvozeného DMP.

3.1. Zpracování archivních LMS

Zpracování archivních LMS s odpovídající kvalitou je složitější než zpracování současných LMS. Parametry vnitřní orientace nejsou obvykle k dispozici a nejčastějším problémem je chybějící katalog GCP. GCP použité pro zpracování dat je tedy nutné identifikovat na archivních LMS a současném (nebo jinak časově vhodném) zpracovaném ortofoto. Informace o nadmořské výšce pro každý z GCP musí být získány z příslušného výškového zdroje dat nebo přímo zaměřeny v terénu. Identifikace GCP je problematická v oblastech s

velkými změnami krajiny (např. povrchová těžba, výstavba vodní nádrže). Kvalita archivních leteckých snímků je navíc ovlivněna použitým fotomateriálem (šum zrna na snímcích), dlouhodobým skladováním (zkreslení) a možným nešetrným zacházením (škrábance na snímcích).



Obr. 2 Srovnání digitálního modelu povrchu odvozeného (DMP) v rámci vodní nádrže Skalka z archivních leteckých snímků a zpracovaných starých map. A – odvozené ortofoto ze snímků pořízených v roce 1948. B – DMP odvozený ze snímků z roku 1948. C – digitální model reliéfu (DMR) odvozený z vektorizovaných vrstevnic (rok 1960) pomocí rastrové interpolace. D – DMR odvozený z vektorizovaných vrstevnic (rok 1960) pomocí triangulace.

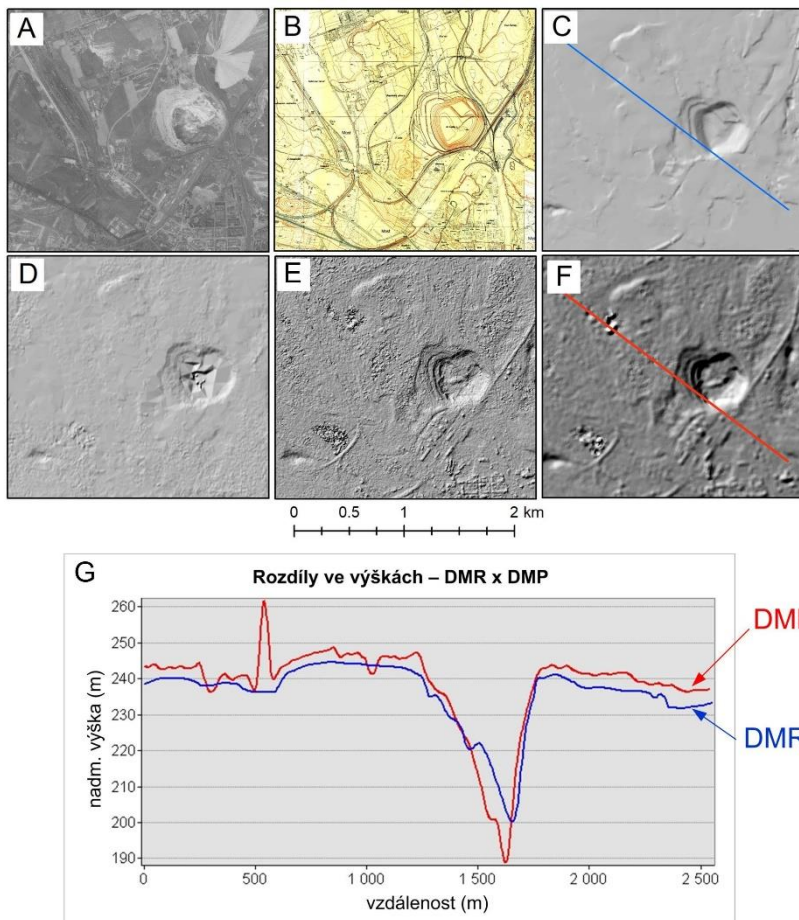
Vliv šumu obsaženého v archivních LMS v oblasti vodní nádrže Skalka na kvalitu odvozeného DMP z roku 1948 je prezentován na Obr. 2-B. Struktura krajiny je ukázána na Obr. 2-A. Na Obr. 2 je následně k porovnání vizualizován DMR odvozený z vektorizovaných vrstevnic (mapa z roku 1960) pomocí rastrové interpolace (C) a triangulace (D). Jak je z obrázku patrné, DMP odvozený z archivních LMS bez jakéhokoliv zásahu předzpracování dat sice vystihuje obecnou charakteristiku terénu, nicméně množství

šumu znemožňuje vyžít tento DMP pro relevantní rekonstrukci předpřehradní topografie.

Pokud by naším cílem bylo pouze odvodit ortofoto z archivních LMS za účelem studia změn krajinného krytu (Obr. 2-A), můžeme se spokojit s nižší kvalitou odvozeného DMP (které je v rámci procesu využíváno pro ortorektifikaci snímků), nicméně při rekonstrukci předpřehradního reliéfu je nutné pracovat s daty s ověřenou přesností a vysokou kvalitou (nutné k identifikaci změn v rámci dynamiky změny dna vodní nádrže).

V publikaci [8] a [26] byly představeny metody pro odstranění obrazového šumu z archivních LMS a vyhlazení DMP. Popsané metody a filtry byly aplikovány na 10 leteckých snímcích z roku 1953 na identickém zájmovém území jako v [20]. Tato lokalita byla vybrána zejména proto, že pro ni existuje množství zpracovaných dat z předchozího výzkumu. Její charakter (oblast s povrchovou těžbou) je navíc vhodná pro testovací účely. Letecké snímky byly zpracovány v prostředí Agisoft Metashape a v rámci [20] s využitím metod klasické fotogrammetrie. Na Obr. 3-A je zájmová oblast na odvozeném ortofoto z roku 1953, na Obr. 3-B pak Státní mapa 1:5 000 (s přímo měřeným výškopisem).

DMP odvozený z leteckých snímků pomocí fotogrammetrického softwaru IMAGINE (Obr. 3-D) obsahuje viditelné interpolační artefakty a chybí mnoho detailů. DMP odvozený pomocí modelování SfM (obr. Obr. 3-E) obsahuje mnoho detailů a po aplikaci metod vyhlazování obsahuje výsledný DMP výrazně menší množství šumu (Obr. 3-F). DMR interpolovaný z ručně vektorizovaných vrstevnic je hladký a dobře reprezentuje modelované území (Obr. 3-C). Následně byly porovnány oba výškové profily odvozené z vyhlazeného DMP a DMR odvozeného z vrstevnic (Obr. 3-G). Výškový profil byl vymezen v oblastech pokrytých nízkým počtem GCP, aby bylo možné otestovat výškovou přesnost výsledného DMP. Ve srovnání s DMR odvozeným z vrstevnic je ve většině studovaných intervalů DMP nadhodnocený.



Obr. 3 Odvozené digitální modely povrchu (DMP) a reliéfu (DMR) na základě archivních map a leteckých snímků. A - testovací oblast na ortofoto z roku 1953. B - oblast na Státní mapě 1:5 000. C - DMR odvozený z vrstevnic. D - DMP zpracovaný pomocí metod klasické fotogrammetrie. E – DMP zpracovaný s využitím Structure from Motion modelování. F – DMP odvozený z leteckých snímků s vyhlazeným šumem. G – graf srovnávající výškové profily definované v částech C a D.

Porovnáme-li potřebné vstupy (hardware, licence), dobu zpracování, náklady na surová data¹ a kvalitu výstupu, dospějeme k

¹ Jeden archivní letecký snímek zakoupený v rámci Geoportálu ČÚZK stojí v dnešní době 500 Kč.

závěru, že digitalizace vrstevnic je přesnější a efektivnější způsob tvorby před-přehradního reliéfu (pokud je vhodná mapa k dispozici).

Archivní LMS mají i přesto velký potenciál využití při rekonstrukci reliéfu. Aktuálně jsou v rámci výzkumu ve spolupráci se studenty doktorského studia řešeny následující otázky:

- metody filtrace/vyhlazování archivních LMS,
- vliv rozložení (resp. absence) vlíčovacích bodů na kvalitu DMP,
- využití algoritmů pro filtraci mračna bodů na archivních datech – odstranění stromů a zástavby,
- možnosti optimálního napojení různých časových řad archivních LMS.

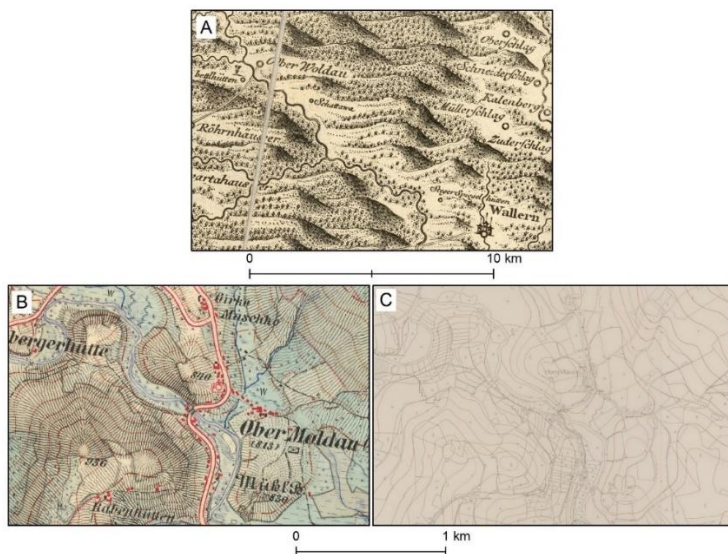
4. Staré mapy a rekonstrukce reliéfu

Staré mapy mohou obsahovat výškopisné informace reprezentované různými způsoby. V nejstarších mapách (např. Müllerova mapa Čech z roku 1720) jsou výškopisné informace znázorněny ikonograficky pomocí zakreslených kopců (viz Obr. 4-A). Později (od 1. vojenského mapování habsburské monarchie, 60. léta 17. století) se používala tzv. šrafura. V práci [34] byl prezentován pokus o rekonstrukci georeliéfu na základě šraf obsažených ve 2. vojenském mapování habsburské monarchie (40. léta 18. století), nicméně výsledný rekonstruovaný reliéf měl velmi proměnlivou kvalitu.

Rozhodujícím faktorem pro rekonstrukci georeliéfu na základě starých map je tak přítomnost přesných vrstevnic a výškových bodů.

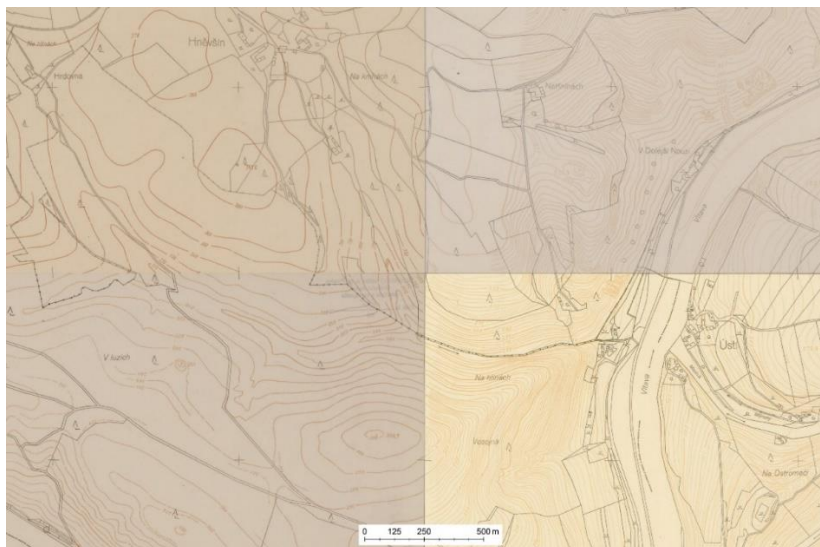
Nejstaršími mapami (ve středoevropském regionu), které obsahují vrstevnice, jsou mapy 3. vojenského mapování habsburské monarchie vytvořené v letech 1876-1880 na území dnešní České republiky. Tyto vrstevnice jsou však viditelně odvozeny na základě šraf (viz Obr. 4-B), a proto je jejich přesnost sporná. Mapy 3. vojenského mapování habsburské monarchie (v měřítku 1:25 000) reambulované ve 30. letech 20. století vrstevnice obsahují (s intervaly 2,5 - 20 m v závislosti na členitosti terénu) a jsou vhodné pro velkoplošnou rekonstrukci georeliéfu s nízkými požadavky na

přesnost [7], ale tyto mapy pokrývají pouze oblast severozápadních Čech.



Obr. 4 Ukázka výškopisu na starých mapách v oblasti Horní Vltavice. A – Müllerova mapa Čech. B – 3. vojenské mapování habsburské monarchie. C – první vydání Státní mapy odvozené 1:5 000 z roku 1953.

Nejstarší mapové dílo, které kompletně pokrývá celou Českou republiku a obsahuje výškopis ve formě vrstevnic a výškových kót je 1. vydání Státní mapy odvozené 1:5 000 (SMO-5) z padesátých let 20. století (mapy vydané mezi roky 1950 až 1959) – viz Obr. 4-C. Přestože jednotlivé mapové listy pocházejí z jedné mapové série, obsahují vrstevnice s různými intervaly odvozené z různých výškopisných map a dalších datových zdrojů: Topografické mapy generálního štábu Československé armády 1:25 000 (TM25), 1:10 000 (TM10), 1:5 000 (TM5) a z Topografické mapy hlavního města Prahy a okolí v měřítku 1:5 000 (TP5). S ohledem na to není celá oblast pokryta vrstevnicemi o homogenním intervalu, ale interval vrstevnic se mění od 1 m (nejpodrobnější) až po interval 20 m (nejobecnější) - viz Obr. 5.



Obr. 5 Rozdílný interval vrstevnic v rámci sousedních mapových listů prvního vydání Státní mapy odvozené 1:5 000.

4.1. Postup zpracování starých map

Zpracování starých map má standardizovaný postup. Ve většině případů se jedná o následující kroky:

1. skenování originálních map s využitím speciálního mapového skeneru,
2. georeferencování mapových listů v prostředí Geografického Informačního Systému (GIS),
3. vektorizace vrstevnic (a případně výškových bodů), včetně uložení informace o jejich nadmořské výšce do připravené datové struktury,
4. interpolace výškových dat do podoby DMR.

V současné době existuje množství digitálních archivů obsahujících digitalizované archivní mapy [2], [3], [18], [19], díky čemuž odpadá nutnost skenovat originální mapy. Velké množství map vhodných pro rekonstrukci georeliéfu v místě vodních nádrží je však v archivech správců povodí, státních archivech a soukromých sbírkách, kdy je nutné mapy naskenovat v požadované kvalitě.

Georeferencování map je tedy v mnoha případech první a důležitý krok při jejich zpracování. Jedná se o umístění naskenované mapy do její geografické polohy (v prostředí GIS). Při georeferencování map se využívají tzv. identické body – vždy se jedná o dvojici bodů, kdy je jeden z nich identifikován na zpracovávané mapě (tzv. zdrojový souřadnicový systém) a druhý, jemu odpovídající, v tzv. cílovém souřadnicovém systému. Body v cílovém souřadnicovém systému můžeme volit dvěma způsoby – můžeme identifikovat přímo odpovídající body (neměnné v čase) v georeferencované mapě, nebo na zpracovaném leteckém snímku (zde se volí např. křižovatky cest, rohy významných budov).

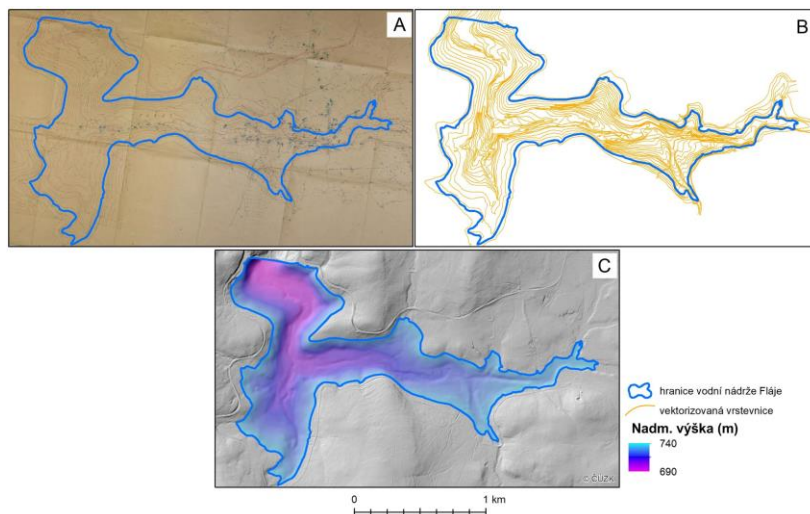
Druhý způsob, využívaný v případě kartografických děl s definovaným kladem mapových listů, je využití předem známých souřadnic významných bodů – v našem případě souřadnic rohů kladu mapového listu. Pro každý georeferencovaný mapový list tak jsou použity 4 body (rohy mapových listů) a k nim odpovídající identické body z vektorové vrstvy kladu map. Pro transformaci do souřadnicového systému S-JTSK je vhodné zvolit metodu projektivní transformace [23].

Vektorizace vrstevnic v prostředí GIS může být provedena několika způsoby – nejjednodušší přístup je plně manuální vektorizace, kdy operátor ručně „okliká“ všechny vrstevnice. Pokročilejší metoda je semi-automatická vektorizace, v rámci které operátor taktéž musí myšičkou ovládat proces vektorizace, nicméně za pomoci speciálních nástrojů softwaru se využívá přichytávání na rastrový podklad či automatické sledování průběhu rastrových buněk s následným generováním vektoru. Automatická vektorizace oproti předchozím dvěma metodám spočívá v nastavení vstupních parametrů a následném automatickém generování vektoru [14]. V posledních letech je pro extrakci prvků z topografických map využíváno i metod strojového učení [15].

Jako poslední krok je provedena interpolace do podoby DMR s využitím vhodné interpolační funkce. Dle [17] je vhodnou interpolační metodou pro tvorbu DMR dna vodní nádrže vytvoření trojúhelníkové sítě s využitím Delaunayho triangulace. Triangulace vrstevnicových dat (resp. lomových bodů odvozených z vrstevnic) má ovšem také své specifické nedostatky (např. ploché vrcholy kopců,

„schody“ v údolnicích) a proto při tvorbě DMR pro oblast zahrnující dno vodní nádrže a okolní krajinu je vhodné využít kombinaci interpolačních metod [23].

Ukázka kompletního zpracování rekonstrukce dna vodní nádrže Fláje je ukázáno na Obr. 6.



Obr. 6 Rekonstrukce před-přehradní topografie v místě vodní nádrže Fláje. A – vstupní mapa z roku 1960 (zdroj: archiv Povodí Ohře s. p.). B – vektorizované vrstevnice. C – interpolovaný hloubkový rastr doplněný o vrstvu stínovaného reliéfu. V okolí vodní nádrže jsou prezentovaná data Digitálního modelu reliéfu 5. generace © ČÚZK.

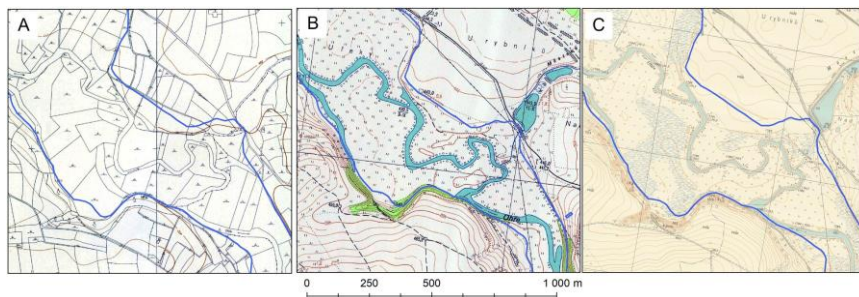
4.2. Problematické aspekty využití starých map při rekonstrukci před-přehradního reliéfu

Jak bylo prezentováno v předchozí podkapitole, metodika odvození DMR z archivních map je pro potřeby rekonstrukce „běžné“ krajiny s nízkými požadavky na přesnost ověřená a přímočará. V případě vodních nádrží, kdy je zapotřebí pracovat ve velkém měřítku a s daty o vyšší přesnosti, se v mnoha případech dostáváme do obtížné situace. Identifikované problémové aspekty můžeme rozdělit do následujících čtyř skupin:

1. u dostupných map nevhodný interval vrstevnic,
2. diskutabilní kvalita výškopisu,

3. v rámci jednoho mapového díla (resp. jedná řady) jsou dostupné mapy o různém stáří a aktualizaci,
4. obtížné získávání map z archivů podniků.

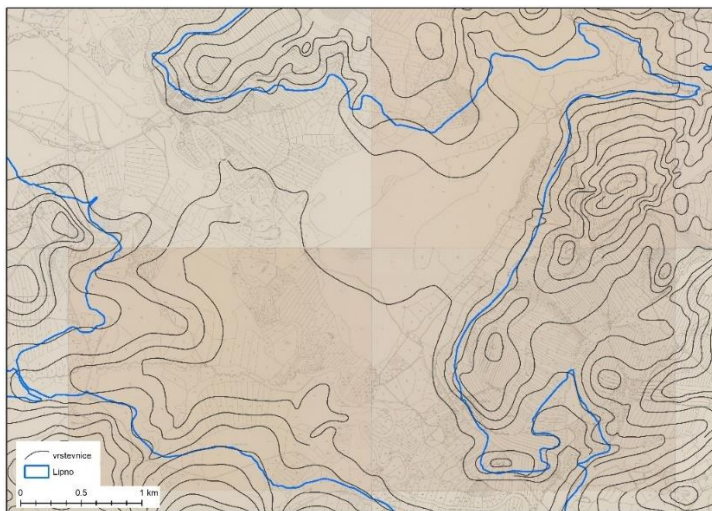
Při rekonstrukci před-přehradního reliéfu je vždy kýžené identifikovat, získat a zpracovat mapu, která reprezentuje původní tvar krajiny a obsahuje přesně odvozené vrstevnice. Mapy obsahující výškopis dostupné na veřejných mapových portálech [3] ve většině případů zahrnují mapy SMO-5 různých dat vydání, Vojenské topografické mapy v systému S-1952 v měřítkách 1:10 000, 1:25 000 a výjimečně v měřítku 1:5000.



Obr. 7 Vrstevnice reprezentující výškopis v oblasti vodní nádrže Skalka u Chebu. A - Státní mapa odvozená 1:5000. B - Vojenská topografická mapa v systému S-1952 v měřítku 1:10 000. C - Vojenská topografická mapa v systému S-1952 v měřítku 1:5000. Hladina vodní nádrže je znázorněna modrou linií.

Obr. 7 představuje sadu mapových podkladů dostupná pro vodní nádrž Skalka u Chebu na Geoportálu ČÚZK. Na Obr. 7-A je mapa SMO-5, která v tomto mapovém listu obsahuje výškopis s intervalem vrstevnic 20 m. Jak je patrné – v oblasti vodní nádrže (vymezené modrou linií) není pro rekonstrukci výškopisu ani jedna vrstevnice. Na Obr. 7-B je mapový list Vojenské topografické mapy v měřítku 1:10 000. V oblasti vodní nádrže jsou již k dispozici vrstevnice s intervalem 2 m. Odvozený DMR byl následně porovnán s daty získanými z batymetrického mapování pořízených pomocí georadaru (viz kapitola 5). Výsledkem byl nesoulad mezi odvozeným před-přehradním reliéfem a profily získanými z batymetrického mapování. Při podrobnějším studiu tiráže mapového listu je možné identifikovat, že výškopis mapy byl odvozen tzv. „stolovou metodou“. Na Obr. 7-C je výřez Vojenské topografické mapy v měřítku 1:5 000. Výškopis v rámci této mapy byl odvozen „metodou číselnou“, v mapě

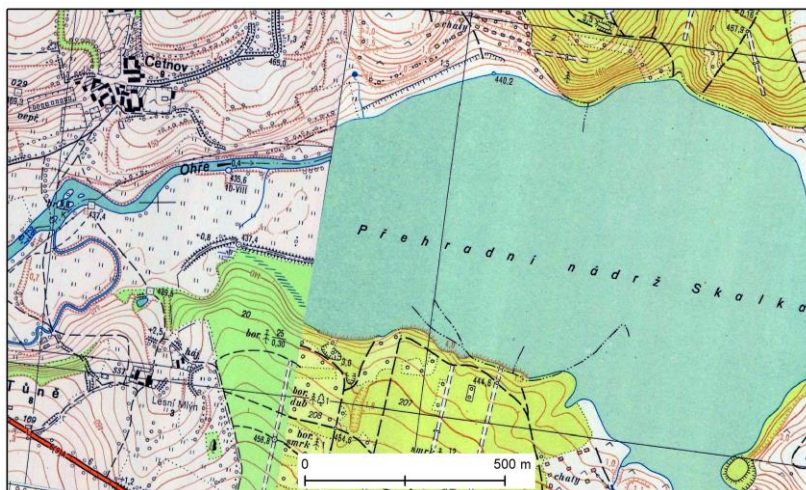
je možné identifikovat body tzv. „pořičního polygonu“, ze kterého bylo přímé měření realizováno. Jedná se tedy o velmi přesnou mapu, která obsahuje vrstevnice o intervalu 1 m.



Obr. 8 Vrstevnice vektorizované ze Státní mapy odvozené 1:5 000 v kontrastu se současnou hranicí vodní plochy v oblasti vodní nádrže Lipno.

Kvalitu výškopisu lze posoudit i vizuálně – na Obr. 8 v oblasti vodní nádrže Lipno ukázán výškopis vektorizované z map SMO-5. Nejen že vrstevnice s intervalem 20 m nevhodně popisují terén v oblasti vodní plochy, ale vrstevnice navíc kříží hranici vodní plochy.

Problematické může být i napojení sousedních mapových listů v rámci jednoho mapového díla. Na Obr. 9 je ukázána bezešvé složení dvou mapových listů Vojenské topografické mapy v měřítku 1:10 000 dostupných na Geoportálu ČÚZK pro oblast vodní nádrže Skalka. Levý mapový list byl vytvořen v roce 1958 a pravý až v roce 1966, kdy byla vodní nádrž již dokončena a napuštěna.



Obr. 9 Problematická návaznost mapových listů Vojenských topografických map 1:10 000 v systému S-1952 v oblasti vodní nádrže Skalka.

Další datové sady jsou dostupné v rámci okresních a krajských archivů, případně v archivech vodohospodářských společností. Zde jsme pro některé průmyslové oblasti identifikovali např. Státní mapy 1:5 000, které mají výškopis přímo měřený, na rozdíl od SMO-5. Na pracovišti Povodí Ohře s.p. na Flájích byla identifikována „Mapa výkupu“ s podobným výškopisem a na pracovišti v Chomutově „Mapa plánu výstavby vodního díla Nechanice“. Mnoho dalších map bylo nalezeno v archivech při studiu původního koryta řeky Vltavy.

V mnoha případech je problematické zajistit digitalizaci archiválií identifikovaných v rámci archivů (nedostupnost skeneru, nemožnost zapůjčení originálů). Klasická fotografie není vhodná metoda, jelikož se jedná o středovou projekci a v mnoha případech není možné zajistit (např. s ohledem na sklady map) rovné rozložení mapy. V tomto případě se osvědčila metoda malosnímkové fotogrammetrie, kdy je mapa fotoaparátem nasnímána z různých pozic s podélným a příčným překrytem (analogicky jako při snímkování krajiny z dronu), jsou oměřeny rámové značky a následně je mapa zpracována softwarem využívajícím SfM modelování. Tímto způsobem je zajištěno, že výsledná mapa je odvozena jako pravoúhlý průmět do roviny na základě zdrojových snímků.

4.3. Ověření kvality výškopisu použitých archivních map

S ohledem na problematické aspekty přesnosti archivních map využívaných k rekonstrukci před-přehradního reliéfu je důležitou součástí výzkumu ověření jejich kvality (resp. přesnosti výškopisu). Ověření se provádí s využitím tzv. kontrolních bodů, které jsme schopni identifikovat v rámci hodnoceného mapového listu a v realitě. V případě rekonstrukce před-přehradního reliéfu jsme omezeni pouze na oblasti mimo současnou vodní plochu a s vyloučením míst, kde došlo k dalším možným změnám krajiny. Toto je problematické u archivních map, které zahrnují pouze výškopis vodní nádrže a jeho blízkého okolí – výběr oblastí pro identifikaci kontrolních bodů je pak omezený. Jako referenční data je možné využít např. přímé měření s využitím GNSS, které umožňuje přesnou metodu měření polohopisu i výškopisu v řádech centimetrů. Pro hodnocení větších oblastí je pak možné využívat data odvozená z leteckého laserového skenování (LiDAR). „Digitální model reliéfu České republiky 5. generace“ (DMR-5G), který pokrývá celé území ČR obsahuje data se střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Data jsou dostupná v rámci Geoportálu ČÚZK. Laserová data pořízená skenerem Riegl VUX-1LR v rámci našeho výzkumu pak mají střední chybu výšky 0,1 – 0,15 m [9]. Ukázka hodnocení kvality výškopisu map využitých pro rekonstrukci před-přehradní topografie u vodní nádrže Skalka a Nechranice je v Tab. 1. Kvalita je zde hodnocena s využitím střední kvadratické chyby (Root Mean Square Error – RMSE).

Tab. 1 Ukázka hodnocení kvality výškopisu v mapách použitých pro rekonstrukci před-přehradního reliéfu.

Typ hodnocených bodů	Počet kontrolních bodů	RMSE výšek
Skalka (obecné body)	742	55 cm
Skalka (rovinatá krajina)	113	30 cm
Nechranice (rovinatá krajina)	358	68 cm
Nechranice (strmé svahy)	559	2,8 m

Jak již bylo uvedeno, první vydání map SMO-5 z padesátých let 20. století je nejstarší mapové dílo, které souvisle pokrývá celé území České republiky a obsahuje výškopis. Tyto mapy jsou proto velmi často využívány pro rekonstrukci krajinného krytu i georeliéfu. V případě větších oblastí, kdy je potřeba zpracovat celé území souvisle, neexistují alternativní archivní data, která by je nahradila (mimo archivní letecké snímky, jejichž problematika je diskutována v kapitole 3) [23]. V rámci projektu MK ČR NAKI – Vltava² bylo provedeno ověření kvality výškopisu obsaženého v mapách SMO-5. V rámci testování byly zohledněny zdroje výškopisu (TM5, TM10, TM25 a TP5) a intervaly vrstevnic, které se v rámci jednotlivých mapových listů vyskytují - 1, 2, 5, 10 a 20 m. Celkem bylo použito více než 4 miliony bodů, které byly převzaty z vektorizovaných vrstevnic (byly vyloučeny body v místě vodních nádrží). Jako referenční data byl použit DMR-5G.

S využitím metod geostatistiky byla hodnocena celkem tři kritéria:

- chyby by neměly být prostorově autokorelované (měly by být náhodně rozmístěny),
- chyby by měly mít normální (nebo alespoň symetrické) rozdělení se střední hodnotou 0,
- chyby by neměly být závislé na nadmořské výšce.

Kompletní hodnocení přesnosti výškopisu je map SMO-5 je publikováno v [23]. Výsledky můžeme shrnout tak, že byla porušena všechna tři kritéria. Prostorová autokorelace byla identifikována v rámci všech mapových zdrojů i intervalů vrstevnic.

U testu normality jsou chyby rozloženy asymetricky s vysokou koncentrací kolem střední hodnoty. V oblastech odvozených na základě vrstevnic s intervaly 1, 10 a 20 m lze identifikovat části, kde je nadhodnocena nadmořská výška, na druhou stranu oblasti odvozené na základě vrstevnic s intervaly 2 a 5 m jsou naopak silně podhodnoceny.

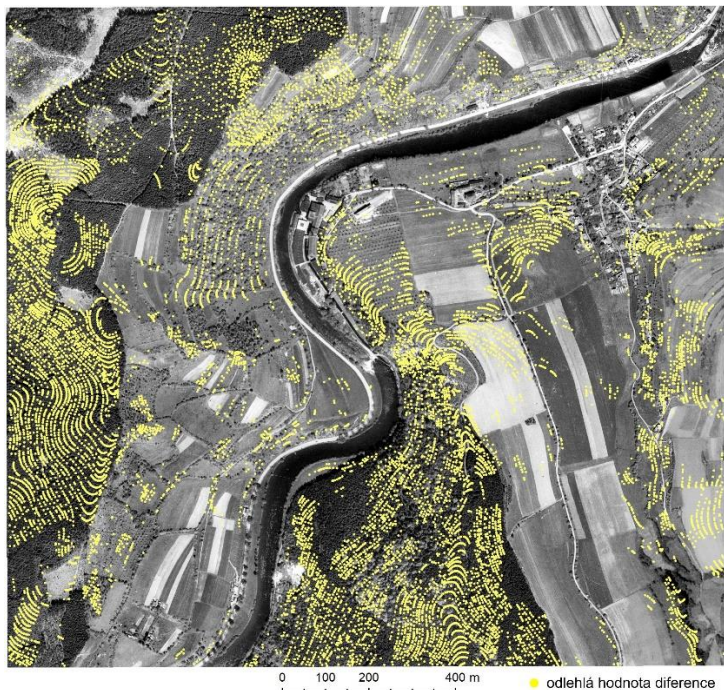
² Projekt MK ČR NAKI: Vltava – proměny historické krajiny v důsledku povodní, stavby přehrad a změn ve využití území s vazbami na kulturní a společenské aktivity v okolí řeky. DG18P02OVV037.

V rámci testování stability výšek bylo zjištěno, že chyby výsledného modelu závisí na nadmořské výšce, ale tato závislost je slabá (celkový nárůst chyb činí 0,02 m s každými 100 m).

- Tato závislost se liší v závislosti na intervalu vrstevnic a typu mapového zdroje.
- Mapový zdroj TM5 vykazuje nejvyšší nárůst chyb modelu v závislosti na nadmořské výšce v rozsahu 2,9 m s každými 100 m převýšení.
- V porovnání s ostatními analyzovanými zdroji dat byl pro interval vrstevnic 20 m a mapový zdroj TM25 indikován poměrně vysoký nárůst chyb (o 0,8 m).
- V případě mapového zdroje TM25 je nárůst o 0,5 m vyšší než u ostatních analyzovaných zdrojů dat.

Závěrem lze konstatovat, že modelové části generované z intervalů vrstevnic 1 a 2 m a mapového zdroje VP5 vykazují nejmenší odchylky od předpokladů prostorové náhodnosti, normálního rozdělení a stability výšek.

Skutečnost, že vrstevnice s intervalem 20 m vykazují výškovou závislost, je pravděpodobně způsobena metodou letecké fotogrammetrie (viz Obr. 10). Proces fotogrammetrického odvození vrstevnic funguje na principu ručního usazení kurzoru "na terén" a propojení míst se stejnou nadmořskou výškou. V zalesněných oblastech není možné určit výšku pod vegetací. Operátor tedy odvozuje vrstevnice na úrovni korun stromů, které jsou redukovány o odhadovanou výšku stromů. V tento okamžik vzniká prostor pro vnášení chyb do odvozování výškopisu – výška stromů je odhadována a chybně uvažována jako homogenní v rámci celé oblasti. Tím může v modelu vznikat systematická chyba, což dokazuje i výrazně vyšší výskyt odchylek v místech s hustou vegetací, viz Obr. 10.



Obr. 10 Body odvozené z vrstevnic o intervalu 20 m vykazující odchylku ve výšce v rámci testovaných dat korelují s místy s vyšší a vysokou vegetací.

5. Metody mapování dna vodních nádrží

První relevantní měření hloubek v rámci vodní plochy provedl na konci 19. století, kdy Dr. P. Wagner vytvořil na základě vlastních měření batymetrické mapy šumavských jezer v měřítku 1:5 000. [30]. Přesnější metodu představil o několik let později prof. V. Švambers, který pomocí teodolitu a úhloměru měřil půdorys jezer, přes které následně napnul ocelový drát, ze kterého v pravidelných vzdálenostech spouštěl závaží [32].

V současné době je pro mapování dna vodních nádrží (ale také oceánů) využíváno různých moderních technologií. V rámci našeho výzkumu pracujeme s jednou z rozšířených metod – sonarem umístěným na lodi [35]. Hustota zkoumaných dat závisí na definovaném plánu průřezu a typu použitého senzoru

(jednopaprskový, vícepaprskový nebo boční skenování). Další možností vizualizace topografie dna (batimetrie) je geofyzikální průzkum. V rámci této přednášky bude prezentováno použití georadaru a parametrického profileru dna. Přestože georadar není primárně určen pro studium vodních nádrží, mnoho studií prokázalo jeho vhodnost při tomto typu výzkumu. Pomocí georadaru lze rekonstruovat topografii dna a objem vody, sledovat výplň sedimentů, jejich tloušťku a rozložení v rámci celé vodní nádrže a posoudit objem nebo charakter sedimentů [4]. Parametrický profiler je často využíván při průzkumu mořského dna a úspěšně se používá i ve sladkovodním prostředí [11].

Pro mapování dna s využitím sonaru bylo použito zařízení Humminbird Helix 7 CHIRP DI GPS G2, umístěné na malém nafukovacím člunu (v kombinaci s elektromotorem), katamaranu, nebo na autonomní lodi postavené na platformě Arduino (Obr. 11-B).

V některých případech byl použit georadar TerraSirch 3000 ovládaný z výše popsaného nafukovacího člunu s anténami 200 a 400 MHz, přičemž byl umístěný a tažený na jiném člunu konstantní rychlostí (Obr. 11-A).



Obr. 11 A - Ukázka umístění georadaru TerraSirch 3000 na taženém člunu. (foto Z. Lend'áková). B – Batymetrická platforma, v pozadí autonomní loď postavená na platformě Arduino.

Při batymetrickém mapování Nechranické přehrady v roce 2019 byl experimentálně použit parametrický profiler SES-2000. Přístroj pracuje s dvojí frekvencí, primární vysokou frekvencí (85-115 kHz) vhodnou pro batymetrický průzkum a sekundární nízkou frekvencí (2-22 kHz) pro penetraci dna. Rozsah penetrace do hloubky vody je 0,5

až 400 m, rozlišení vrstev je 1 až 5 cm a maximální penetrace sedimentů je 40 m v závislosti na typu sedimentu a šumu.

5.1. Využití metod dálkového průzkumu Země v rámci vodních nádrží

K mapování dna přehrad lze za specifických podmínek použít i další techniky dálkového průzkumu Země, včetně satelitních snímků, LiDAR a fotogrammetrie [35]. Využití satelitních snímků je v našich podmínkách problematické. V průběhu našeho výzkumu však došlo na některých vodních nádržích (Fláje, Nechranice, Skalka, Les Království) k extrémnímu úbytku vody, a tak bylo možné k mapování dna (nebo části dna) využít metod, které jsou běžně používané k mapování „suchozemské“ topografie.



Obr. 12 A – nízký stav vody na Skalce, listopad 2019 (foto Dominik Brétt). B – nízký stav vody na Nechranicích, listopad 2018.

Stavební práce spojené se snížením hladiny vody umožnily fotogrammetrické snímkování v rámci Flájské přehrady na podzim 2015 a vodní nádrže Nechranice na podzim 2018. V roce 2018 proběhlo letecké snímkování také v rámci přehrady Les Království, kde bylo snížení hladiny vody spojeno s nedostatkem srážek. Letecký snímkování bylo provedeno pomocí malého letadla. Byla použita kamera Hasselblad A6D-100 s objektivem Hasselblad HC f3,5/50 mm-II.

Nízká hladina vody byla také v létě 2011 na vodní nádrži Skalka. V tuto dobu probíhalo mapování ČÚZK s využitím leteckého laserového skeneru, které je dostupné pro veřejnost jako DMR-5G. Díky této shodě okolností existují podrobná data LiDAR pro horní polovinu této vodní nádrže.

Podobně nízká hladina vody se opakovala v listopadu 2019. Pro snímkování LiDAR v rámci našeho výzkumu byl použit skener Riegl VUX1-LR (provozovaný FŽP UJEP) v kombinaci s malým letadlem. Výsledná hustota bodového mračka na obnaženém dně přehrady byla 25 bodů/m².

Na základě těchto dat bylo možné provést rekonstrukci dna uvedených vodních nádrží s vysokou přesností. Tato unikátní data dále posloužila k hodnocení kvality přímo měřených batymetrických dat a také jako jedna časová vrstva použitá k hodnocení dynamiky změn sedimentu ve vodních nádržích.

5.2. Rekonstrukce dna na základě měřených dat

V rámci našeho výzkumu³ byla pro rekonstrukci současného stavu dna vodních nádrží nejčastěji využívána prostorová data pořízená sonarem z plovoucí lodě (Obr. 11). Jelikož je námi používáný sonar Humminbird Helix 7 pouze jednopaprskový, zaznamenává při pohybu lodi pouze jeden bod na dně (vůči aktuální poloze sonaru na hladině) v definovaném intervalu. Batymetrické mapování vodních ploch tak nebylo zaměřené na celoplošné podrobné mapování, což je s využitím jednopaprskového sonaru problematické, ale struktura mapování byla definována s ohledem na rozlohu a technické možnosti plavidla. S ohledem na rozlohy vodních nádrží byly jednotlivé mapované profily od sebe vzdálené mezi 50 až 200 m.

Surová data ve formě souřadnic bodů byla následně zpracována do podoby prostorových dat v prostředí GIS. Důležitým faktorem je volba interpolační metody pro tvorbu DMR dna vodní nádrže. Interpolační metody byly stejné jako v případě zpracování starých map – pro vizuální interpretace a vizualizace to byly rastrové interpolační metody, pro tvorbu analytických podkladů pak triangulace. Je potřeba mít na paměti, že s ohledem na proměnlivou hustotu vstupních dat pro interpolaci jsou pro analytické účely validní

³ GA ČR Vývoj sedimentace v přehradních nádržích jako antropogenních bariérách v říčních systémech: od materiálové bilance po osud polutantů, reg. č. 17-06229S, IGA UJEP Využití metod geoinformatiky pro sledování změn krajiny, SGS UJEP Bezkontaktní metody sběru prostorových dat jako nástroj pro modelování a sledování životního prostředí člověka.

pouze data odvozená ve směru batymetrického měření. Většina vodních nádrží byla mapována tak, aby bylo možné (i s omezenou přesností) rekonstruovat DMR v rámci celé vodní nádrže.

Georadar i profiler byly použity pouze pro mapování předem vybraných profilů. Zpracování dat bylo následně provedeno za použití specializované software. Zpracování a interpretace bylo provedeno na partnerské instituci – Katedře geologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci.

Zařízení pro sběr fotogrammetrických snímků není vybaveno GNSS-inerciálním systémem, proto bylo před zahájením letecké kampaně vždy nutné provést signalizaci a zaměření vličovacích bodů. Body jsou měřeny pomocí GPS-RTK s polohou i výškovou přesností 3–5 cm. Pořízené letecké snímky byly zpracovány do podoby ortofoto a odvozeného DMR s prostorovým rozlišením 3–6 cm/pixel (v závislosti na výšce letu).

Data letecké laserového skenování pořízená v rámci DMR-5G jsou distribuována jako již zpracované mračno bodů. Body byly v prostředí GIS převedeny do podoby DMR s doporučeným rozlišením 1 m/pixel.

Data pořízená v rámci naší snímkovací kampaně skenerem Riegl VUX1-LR jsou dále zpracovaná jako komplexní mračno bodů, zahrnující vegetaci a antropogenní prvky. Důležitým krokem před odvozním DMR tedy je odfiltrovat tyto body, aby výsledný rastr reprezentoval tzv. „holou zem“. Výsledná hustota bodového mračna na obnaženém dně přehrady byla 25 bodů/m². Na základě těchto bodů bylo možné odvodit DMR s prostorovým rozlišením až 20 cm/pixel.

5.3. Ověření kvality měřených dat

Ověřování kvality prostorových dat získaných bezkontaktním měřením, používaných pro modelování dna vodní nádrží je problematické, nicméně posouzení kvality získaných dat je důležité pro celkovou kvalitu výsledků.

Kvalitu dat získaných sonarovým batymetrickým mapováním lze hodnotit v laboratorních podmínkách nebo porovnáním s měřenými profily. Laboratorní test byl proveden v létě 2014, před prvním batymetrickým měřením nádrže Nechranice, v mělkém zahraním

bazénu. Výsledky neprokázaly žádné významné rozdíly oproti přímo měřené hloubce (1,3 m). Přímá a systematická měření profilů/průřezů v nádržích za účelem ověření kvality batymetrických dat jsou s ohledem na velikost, hloubku a charakter nezpevněného bahna na dně obtížně proveditelná.

Jak bylo již uvedeno v podkapitole 4.3, měření LiDAR provedené v roce 2011 ČÚZK v nádrži Skalka má definovanou přesnost RMSE 18 cm na otevřených plochách. Přístroj Riegl VUX1-LR, použitý pro průzkum nádrže Skalka na podzim 2019, má přesnost laserového paprsku 15 mm a preciznost 10 mm. Trajektorie je dodatečně zpřesněna s výslednou polohovou přesností ca. 5 cm. Výsledná data mají střední polohovou chybu (RMSE) výšek 10–15 cm.

Velmi nízká hladina vody u vodní nádrže Nechranice a Skalka umožnila získání referenčních dat v prostoru dna vodních nádrží s využitím přesných metod topografického mapování (fotogrammetrie, LiDAR, GNSS). Metoda GPS-RTK byla použita v rámci Nechranic pro měření bodů na relevantních površích bez usazeného sedimentu (např. na zpevněných površích tehdejších komunikací – viz Obr. 12-B). Metoda fotogrammetrie (použita v rámci Nechranic) i LiDAR (použitý na Skalce) homogenně pokrývají výškovými body celou oblast. Přesnost georadaru mohla být ověřena pouze ve vztahu k batymetrickému měření – k tomuto účelu byly použité dva profily na Skalce, které byly měřeny jak sonarem, tak georadarem. Výsledky hodnocení kvality jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Ověření přesnosti měřených dat

Typ měření	Počet kontrolních bodů	RMSE výšek
Sonar	3 (měřené GPS-RTK)	9,5 cm
Sonar	1122 (všechny body z DMP)	69 cm
Sonar	34 (body na zpevněných površích)	24 cm
Georadar	254 (měřeno sonarem)	14 cm
Fotogrammetrie	16	4 cm
LiDAR – 2011	-	18 cm (definováno ČÚZK)
LiDAR – 2019	154	9,5 cm

6. Případové studie – rekonstrukce dna vodních nádrží

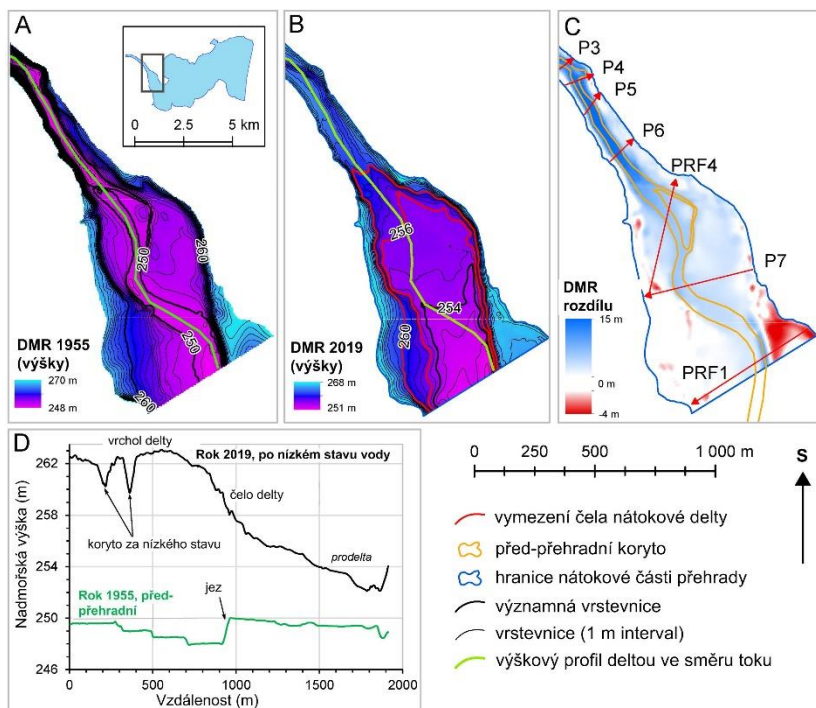
Výzkum zaměřený na změny morfologie dna vodních nádrží, na dynamiku a transport sedimentů v jejich rámci, případně jejich chemismus a znečištění, vyžaduje multidisciplinární tým odborníků, přičemž geoinformatika neodmyslitelně patří do této pestré mozaiky vědeckých směrů. Výsledky společného výzkumu zaměřené na toto nosné téma byly publikovány [1], [5], [11], [16], [22], [23] a [25]. V této kapitole budou prezentovány případové studie věnovány vodní nádrži Nechanice a Skalka, ve kterých bylo dno vodní nádrže rekonstruováno v různých časových horizontech s využitím všech výše popsaných metod. Výzkum byl prováděn v rámci projektu GA ČR *Vývoj sedimentace v přehradních nádržích jako antropogenních bariérách v říčních systémech: od materiálové bilance po osud polutantů* a v rámci projektů Studentské grantové soutěže UJEP.

Druhý směr, který bude v této kapitole prezentován, je rekonstrukce původní krajiny v místě vodních nádrží s ohledem na uchování kulturního dědictví. V tomto výzkumu participují geoinformatici společně s historiky, archiváři a vodohospodáři. Prezentované výsledky zahrnují rekonstrukci původního koryta řeky Vltavy před výstavbou Vltavské kaskády zpracované v rámci projektu MK ČR NAKI: *Vltava – proměny historické krajiny v důsledku povodní, stavby přehrad a změn ve využití území s vazbami na kulturní a společenské aktivity v okolí řeky*.

6.1. Vodní nádrž Nechanice – vývoj nátokové delty

Nechanická přehrada byla postavena v letech 1961-1968. Za normálního stavu vody je její plocha 13,4 km², objem 287 600 m³ a maximální hloubka 46 m. V letech 2015 až 2019 se hladina nádrže pohybovala přibližně od 264 do 269 m n. m. Nádrž, zejména její přítok (Obr. 13), akumuluje znečištění rizikovými prvky (As, Cu, Pb, Zn) z historických těžebních lokalit rozmístěných zejména v Krušných horách. V rámci naší studie [16] byla odhalena značná tloušťka nátokové delty a její význam pro ukládání kontaminace, dynamika delty pak byla podrobně studována v [22]. Sediment obsahuje v přítoku převážně písek a na dně vodní nádrže pak hlavně velmi jemný písek a bahno.

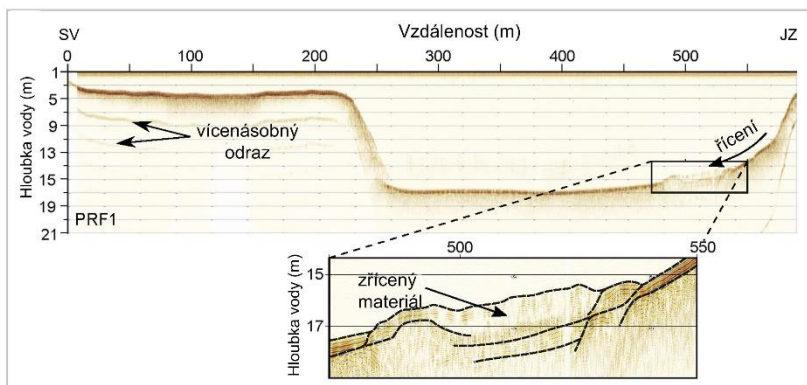
Analýza dynamiky sedimentů byla provedena s využitím časové řady dat, na základě kterých byla provedena rekonstrukce dna vodní nádrže – jednalo se o batymetrické mapování s využitím sonaru z let 2014, 2017 a 2019. V roce 2018 pak bylo provedeno fotogrammetrické snímkování. Před-přehradní reliéf byl rekonstruovaný na základě topografické mapy z roku 1955 získané od Povodí Ohře, s. p. Pro analýzu bylo vybráno několik příčných profilů definovaných v místě batymetrického mapování (na Obr. 13 profily číslované P#). S ohledem na přílišnou hloubku vody, nebylo možné využít georadaru. Bylo však testováno batymetrické mapování s využitím profileru (profily PRF# na Obr. 13).



Obr. 13 Mapa výškových rozdílů v přítoku Nechanrice. A - před-přehradní topografie, B - současná topografie ze sonarového mapování, C - mocnost sedimentů v nádrži jako výškový rozdíl digitálních modelů reliéfu v panelech A a B, D - změna nadmořských výšek v přítokové deltě ve směru původního koryta (zelená linie v panelech B a C) s přiřazením morfologických prvků delty.

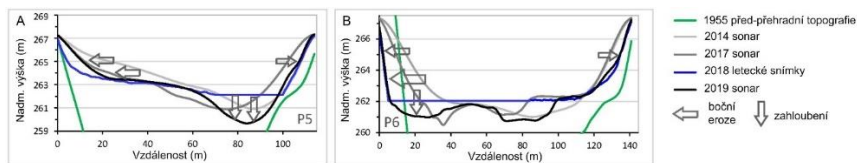
Dno údolí před výstavbou přehrady mělo profil ve tvaru písmene V s meandrujícím korytem a prakticky bez záplavové oblasti nebo podobných ploch v blízkosti koryta (Obr. 13 - A). V současné době se sedimenty z nádrže nahromadily do téměř 13 m mocné sedimentární vrstvy (Obr. 13 - C), která vyplňuje a zarovnáává dno údolí do výšky 260-262 m n. m. (Obr. 13 - B). Ploché vrchol tělesa sedimentů v přítoku Nechranic je ukončen poklesem nadmořské výšky z 261 na cca 256 m n. m. (Obr. 13 - B a D), což je rys typický pro nátokovou deltu.

Cílem použití parametrického profileru bylo získat podpovrchový obraz struktury sedimentů na dně vodní nádrže. Povrch dna nádrže byl jasně patrný ve všech profilech v hloubce až 17 m. Tvořil údolí ve tvaru písmene U (obr. 8), které bylo interpretováno jako povrch delty. V profilu PRF1 (Obr. 14) bylo zjištěno řízení materiálu, pravděpodobně ze zaplaveného údolního břehu. Původní dno vodní nádrže nebylo na datech z profileru zřetelné, což přičítáme mohutné struktuře deltových sedimentů.



Obr. 14 Ukázka výsledků z parametrického profileru - profil PRF1.

Analýza dynamiky sedimentů v nátokové deltě byla provedena s využitím příčných profilů odvozených ze sonarového mapování a leteckých snímků. Jak je patrné z ukázky na Obr. 15, tak v průběhu sledování dynamiky sedimentů dochází k boční erozi a zahloubení. V rámci dalších sledovaných profilů dochází také k bočnímu posunu (depozici) a agradaci. Můžeme tak sledovat posun a zahloubení původního koryta, případně přepracování bočních svahů vodní nádrže.



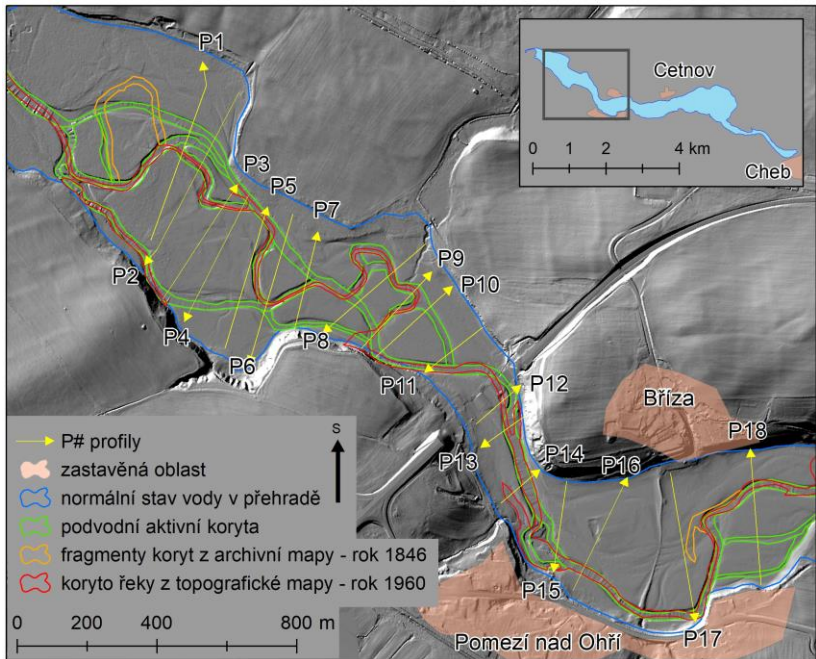
Obr. 15 Ukázky časové řady příčných profilů v oblasti nátokové delty. A - profil P5. B - profil P6.

6.2. Vodní nádrž Skalka – dynamika dna horní části nádrže

Vodní nádrž Skalka byla postavena v letech 1962 až 1964. Za normálního stavu vody je její plocha 3,4 km², objem 19,6 mil. m³ a maximální hloubka vody u hráze je 12 m. Oblast zobrazená na Obr. 16 je vystavena kolísavým změnám hladiny vody při sezónních výkyvech a je předmětem prezentovaného výzkumu. V letech 2015 až 2019 dosahovala hladina vody v nádrži v období od prosince do února přibližně 437,5 m n. m. a v období od června do září přibližně 441,5 m n. m. V záplavovém území Ohře před výstavbou přehrady i v současné vodní nádrži došlo k takové akumulaci Hg z chemické továrny v Marktredwitz, že od počátku provádění instrumentálních analýz Hg byla zakázána konzumace ryb z nádrže [42]. Znečištění Hg je doprovázeno kontaminací Zn, která několikanásobně překračuje limitní koncentrace [41]. Sediment je převážně písčité s příměsí bahna.

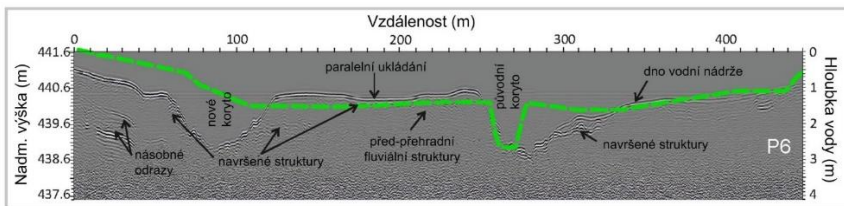
Vodní nádrž skalka byla batymetricky mapována v roce 2017, 2018 a na podzim 2019. Od povodí Ohře, s. p. byly získány data z mapování lodí Joska (Povodí Vltavy, s. p.), provedené ve střední části vodní nádrže v roce 2014. V roce 2018 jsme provedli také mapování s využitím georadaru. Profily zaměřené touto metodou jsou ukázány na Obr. 16.

Dno vodní nádrže během extrémně nízké hladiny vody bylo zaznamenáno v datech ČÚZK DMR-5G v létě 2011. Další takový výrazný výkyv hladiny byl v rámci našeho výzkumu mapován pomocí technologie LiDAR na jaře 2019. Před-přehradní reliéf byl rekonstruován na základě výškopisu odvozeného z Vojenských topografických map 1:5 000 z roku 1960.



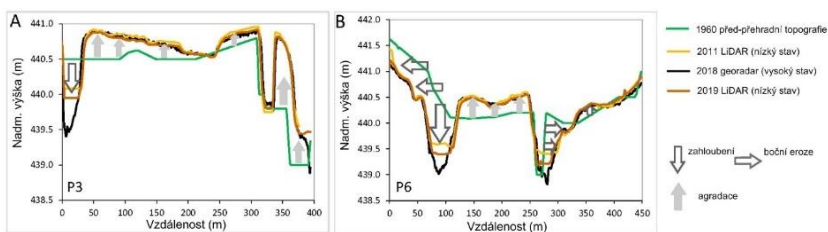
Obr. 16 Podrobné mapy přítoku do nádrže Skalka s vyznačením polohy příčných profilů (P#) a polohy břehových čar historického a současného koryta Ohře. Stínovaná data leteckého laserového skenování znázorňují nízký stav vody v roce 2011.

Analýza změny dna vodní nádrže byla provedena s využitím dat rekonstruovaných ze starých map, dat LiDAR a georadaru. Na Obr. 17 je ukázka zpracovaného profilu pořízeného georadarem v kontrastu s původní, před-přehradní topografií. Hlavním rozdílem mezi novějším DMR a před-přehradní topografií je vytvoření nových kanálů (Obr. 16, Obr. 17). Ačkoli řeka před výstavbou přehrady měla meandrující koryto, přehrazení vytvořilo složitý vícekanálový systém (Obr. 18) s usazenými sedimenty na rovných plochách mezi těmito kanály.



Obr. 17 Profil P6 prezentující aktuální dno vodní nádrže na základě dat získaných georadarem a původní před-přehradní reliéf (zelená linie).

Současná dynamika dna byla vyhodnocena na základě dat LiDAR z let 2011 (ČÚZK) a 2019 (vlastní měření), které byla pořízena v době nízkého stavu vody a snímků georadaru z roku 2018, pořízených při normálním stavu vodní hladiny (Obr. 18). Identifikované recentní změny dna byly většinou jen mírně nad rozsahem nejistoty měření. V měřených profilech ve směru po proudu byly zjištěny změny ve výškách odvozených z LiDAR (2011, 2019), které byly vyšší než výsledky z georadaru (2018) o cca 10 až 20 cm, což naznačuje, že během snižování hladiny mohlo dojít k určité agradaci. Podobnost datových řad LiDAR z let 2011 a 2019 dokumentuje, že k nejdramatičtějším změnám oproti před-přehradní topografii došlo v období mezi výstavbou přehrady a rokem 2011.



Obr. 18 Ukázka analyzovaných profilů odvozených z dat před-přehradní topografie, LiDAR (rok 2011 a 2019) a georadaru. A – profil P3. B – profil P6.

6.3. Rekonstrukce původního údolí řeky Vltavy

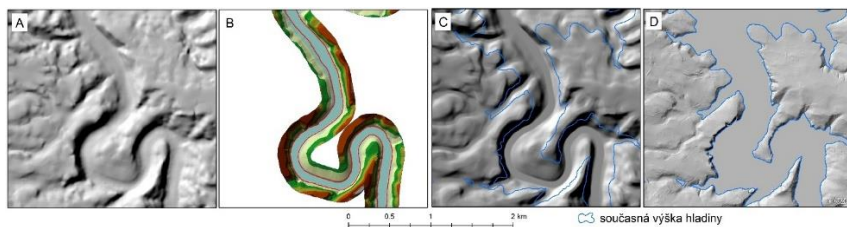
Tato část výzkumu se zaměřuje na rekonstrukci původního koryta řeky Vltavy v oblasti od pramene po soutok s Berouňkou v celkové délce přibližně 300 km. Cílem rekonstrukce bylo, na základě archivních prostorových dat, vytvořit DMR reprezentující původní údolí pro účely prezentace zaniklé krajiny (včetně zaniklého kulturního dědictví) a využitelné pro navazující 3D modelování.

Jako zdrojová data pro rekonstrukci před-přehradní krajiny byly, s ohledem k problematice zpracování archivních LMS diskutované v úvodu přednášky, zvoleny staré mapy - 1. vydání Státní mapy odvozené 1 : 5 000 z padesátých let 20. století (viz podkapitola 4.3). Ve výsledku byla vytvořena mozaika 334 mapových listů map SMO-5 kopírující horní a střední tok Vltavy. Mozaika je bezešvá díky projekční transformaci mapových listů do pravoúhlé sítě (kladu mapových listů). Po usazení map SMO-5 do souřadnicového referenčního systému, bylo nutné vrstevnice vektorizovat.

V průběhu zpracování byl kladen důraz na kvalitu vektorizace výškopisu. Celková délka vektorizovaných vrstevnic je více než 26 000 km, proto byl zvolen přístup kombinace manuální a automatické vektorizace. Automatická vektorizace byla provedena v prostředí GIS s tím, že používané algoritmy vyžadují jako vstupní data binární rastrové soubory. Georeferencované mapové listy SMO-5 tak bylo třeba převést z původních 16,7 milionu barev na výsledný dvoubarevný rastr (tmavá barva reprezentující vrstevnice a světlá reprezentující pozadí). Poloautomatická vektorizace zahrnovala ruční úpravu výsledku s ohledem na mapové prvky, které mají stejnou barvu jako vrstevnice. Další manuální zásahy byly potřebné v místech zobrazujících strmý terén s vysokou hustotou vrstevnic. V rámci ruční editace bylo také nutné ke všem vrstevnicím přidat atribut nadmořské výšky.

Výsledek této fáze představují vektorová výškopisná data (kromě vrstevnic bylo digitalizováno také přibližně 2 000 výškových bodů), která jsou zdrojem pro následné vytvoření 3D modelu historického údolí Vltavy.

Výsledný DMR primárně slouží jako podklad pro 3D tisk a další vizualizace zaniklé krajiny. Základním požadavkem bylo, aby vodní hladina řeky Vltavy byla plochá, se sklonem odpovídajícím okolnímu terénu. Tento požadavek je nerealizovatelný pouze s využitím vektorizovaných vrstevnic. Do tvorby DMR tak byla zařazena další datová sada – výškové body podélného profilu Vltavy, odvozené z mapy z roku 1940. Body podélného profilu řeky reprezentují jednak nadmořské výšky břehu řeky, ale také významné prvky na břehu (jezy, přítoky, ...). Tyto body byly dále pomocí automatického skriptu zahuštěny tak, aby odpovídaly potřebám následné interpolace.



Obr. 19 Kombinace několika digitálních modelů reliéfu do výsledného DMR (nádrž Orlík). A – Před-přehradní reliéf odvozený z vrstevnic a výškových kót. B - Triangulovaná síť v rámci 400m bufferu kolem říčního polygonu. C - Výškové povrchy z A a B sloučené a vyhlazené. D - Aktuální stav hladiny VN Orlík vizualizován nad současnými daty LiDAR. (data LiDAR – Digitální model reliéfu 5. generace © ČÚZK).

Pro tvorbu výsledného DMR bylo testováno několik interpolačních metod implementovaných v různých GIS, ale žádná z interpolačních metod nedokázala zachovat plochou (ale přitom nakloněnou) hladinu vody v řece. Ve výsledku byla použita kombinace rastrové interpolační metody a triangulace. Na Obr. 19 je ukázán detail zpracovaných dat v oblasti vodní nádrže Orlík: Obr. 19-A prezentuje před-přehradní reliéf rekonstruovaný z vektorizovaných vrstevnic a výškových kót, Obr. 19-B triangulovanou nepravidelnou síť v rámci 400 m bufferu kolem říčního polygonu. Pro výsledný DMR byl použit 10 m buffer kolem řeky. Obr. 19-C pak ukazuje sloučení těchto dvou povrchů do bežešvého rastru s požadovanou rovnou a mírně nakloněnou hladinou řeky. Na Obr. 19-D je pak současný stav vodní nádrže Orlík vizualizovaný s využitím dat DMR-5G.

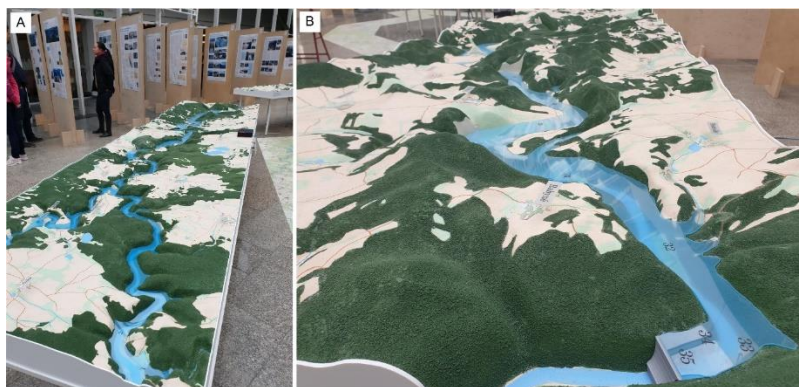


Obr. 20 Ukázka zpracování před-přehradního reliéfu do podoby 3D modelu. A - rekonstruovaný reliéf. B - CNC frézování. C - výsledný model s nanesenou texturou.

Takto vytvořený DMR byl předán k tvorbě reálného 3D modelu. Oblasti vodních nádrží Lipno I, Orlík a Slapy byly vytištěny pomocí metod 3D tisku. Ukázka postupu zpracování je na Obr. 20. Definované měřítko tisku bylo 1:8 000 ($1,25 \times 4$ m) pro nádrž Lipno I a 1:6 000 (1×4 m) pro nádrže Orlík a Slapy. S ohledem k velikosti

výstupních 3D modelů bylo pro finální model použito CNC frézování. Modely byly rozděleny do čtyř dlaždic: $1 \times 1,25$ m pro nádrž Lipno I a 1×1 m pro nádrže Orlická a Slapy. Jako textura je použitý krajinný pokrytí odvozený z map Povinných císařských otisků stabilního katastru, které vznikly v polovině 19. století. Výsledný model vodní nádrže Slapy je na Obr. 21.

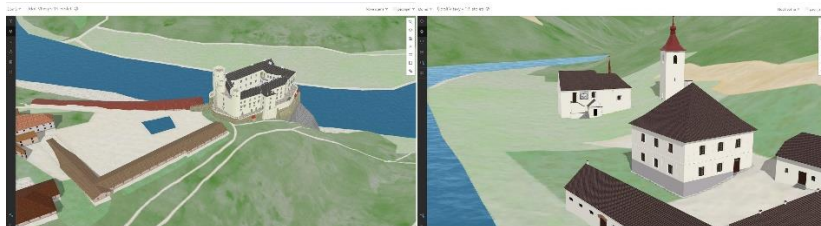
Hlavním cílem velkoplošného 3D tisku je představit v současnosti zatopené údolí Vltavy v původním stavu. Vytvořené a texturované 3D modely původního údolí Vltavy již aktuálně slouží především pro vizualizační účely na výstavách a v muzejních expozicích. Velkou výhodou fyzických 3D modelů (oproti tištěným mapám a fotografiím) je snazší vnímání krajiny jako celku pro laickou veřejnost, včetně uvědomění si změn, které výstavba vodních nádrží přinesla. Další výhodou je zprostředkování rekonstruované krajiny osobám s pohybovým nebo zrakovým postižením.



Obr. 21 Výsledný 3D model vodní nádrže Slapy prezentovaný na výstavě "Vltava v proměnách času". A – pohled na celý model. B – detail v okolí hráze.

Dalším způsobem, jak zaniklou krajinu zpřístupnit široké veřejnosti, je tvorba interaktivních 3D modelů v prostředí internetu. I zmiňovaný před-přehradní reliéf dále posloužil jako základ pro 3D vizualizace původního údolí Vltavy tak, jak vypadalo v polovině 19. století. Rekonstruovaný reliéf byl texturován ve smyslu původního krajinného krytí, který je odvozený z map CO. V terénu jsou pak usazené budovy a vegetace, které vznikly pomocí různých metod 3D modelování (modelování v CAD, procedurální modelování) [31]. Podrobné 3D modely jsou vytvářeny studenty doktorského studijního

programu na Katedře geomatiky FSV ČVUT a v rámci diplomových prací. Výsledný model původního údolí je dostupný v prostředí platformy ArcGIS Online. Ukázka vytvořených 3D modelů budov je na Obr. 22.



Obr. 22 Ukázka prezentace 3D modelů budov s využitím rekonstruovaného před-přehradního reliéfu. Zámek Orlik (vlevo) a Areál kostela Sv. Kiliána v Davli (vpravo).

Závěr

V této přednášce je představena rekonstrukce krajiny v oblasti vodních nádrží s využitím metod geoinformatiky. Primárně byl výzkum cílen na rekonstrukci reliéfu před výstavbou vodních nádrží z archivních prostorových dat a na rekonstrukci aktuálního tvaru dna vodních nádrží s využitím především bezkontaktního sběru dat (batymetrie a topografické mapování).

Pro rekonstrukci před-přehradní topografie je vždy klíčové zvolit vhodný datový zdroj tak, aby pokrýval zájmovou oblast v odpovídajícím časovém období s vhodnou přesností a aby na jeho základě bylo možné odvodit výškový povrch. V rámci přednášky jsou představeny dva hlavní archivní datové zdroje, které jsou využívány pro rekonstrukci zaniklé krajiny – archivní letecké měřické snímky a staré mapy. Tyto datové zdroje jsou běžně používány pro „klasickou“ rekonstrukci krajiny, nicméně při rekonstrukci reliéfu v oblasti vodních nádrží je potřeba k použitým datům a metodám rekonstrukce přistupovat obezřetně. V rámci přednášky jsou prezentována specifika využití těchto archivních zdrojů včetně hodnocení přesnosti na vybraných datových sadách.

Současný stav krajiny pod vodní hladinou je mapován metodami batymetrie. Přednáška představuje jak klasickou metodou s využitím sonaru, ale také méně klasické moderní metody využívající georadaru,

nebo parametrický profiler. Nízký stav vody ve vybraných vodních nádržích umožnil pro mapování dna použít metody standardně využívané pro mapování „suchozemské“ topografie. Díky těmto datům bylo možné ověřit kvalitu batymetrického mapování.

V rámci představených praktických aplikací je na příkladu rekonstrukce dna vodních nádrží ukázáno, jak může aplikace geoinformatiky v kombinaci s dalšími vědními obory posouvat hranice současného vědění.

Představené metody zpracování archivních dat za účelem odvození před-přehradní topografie obsahují velký potenciál dalšího vědeckého výzkumu zaměřeného na zrychlení zpracování dat a zvýšení kvality výsledných modelů krajiny.

Ve spolupráci se studenty doktorského studijního programu je aktuálně prováděn výzkum zaměřený na automatickou extrakci prvků z topografických map s využitím metod strojového učení – hlavním cílem je automatická vektorizace vrstevnic, včetně určení jejich výšek a validace výsledku. V rámci zpracování archivních LMS cílíme na zvýšení kvality odvozeného DMP s využitím filtrů na odstranění šumu, zhodnocení vlivu rozložení GCP na výškovou přesnost DMP a automatické předzpracování snímků s využitím strojového učení.

Batymetrické mapování, zpracování dat a jejich využití pro sledování změn životního prostředí bylo také zavedeno do výuky v rámci předmětů bakalářského (FŽP UJEP) i navazujícího magisterského studia (FSV ČVUT).

Literatura

1. ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, Miguel Ángel, Michal HOŠEK, Jitka ELZNIČOVÁ, Jan PACINA, Karel HRON, Kamila FACEVICOVA, Renata TALSKA, Ondřej BÁBEK a Tomáš M. GRYGAR. Separation of geochemical signals in fluvial sediments: New approaches to grain-size control and anthropogenic contamination. *Applied Geochemistry*. 2020, 123. ISSN 08832927. DOI: doi:10.1016/j.apgeochem.2020.104791
2. Arcanum Maps [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://maps.arcanum.com/en/>
3. Archiv Zeměměřického úřadu [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/archiv/>
4. BÁBEK, Ondřej, Ondřej KIELAR, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Kateřina MANDLÍKOVÁ, Jan SEDLÁČEK a Jitka TOLASZOVÁ. Reservoir deltas and their role in pollutant distribution in valley-type dam reservoirs: Les Království Dam, Elbe River, Czech Republic. *CATENA*. 2020, 184. ISSN 03418162. DOI: doi:10.1016/j.catena.2019.104251
5. BÁBEK, Ondřej, Jan SEDLÁČEK, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Jitka ELZNIČOVÁ, Jitka TOLASZOVÁ a Jan PACINA. Historical pond systems as long-term composite archives of anthropogenic contamination in the Vrchlice River, Czechia. *Anthropocene*. 2021, 33. ISSN 22133054. DOI:10.1016/j.ancene.2021.100283
6. BRŮNA V., J. PACINA, J. PACINA a E. VAJSOVÁ, E. *Modelling the extinct landscape and settlement for preservation of cultural heritage*. *Città e Storia*. 2014, IX, č. 1, 131 - 153. ISSN: 1828-6364
7. BRŮNA, Vladimír, Jiří CAJTHAML, Jitka ELZNIČOVÁ, Jakub HAVLÍČEK, Arnošt MÜLLER, Jan PACINA a Růžena ZIMOVÁ. *Paměť krajiny Ústeckého kraje ukrytá v mapových archivech: metody rekonstrukce a zpracování dat v oblastech zaniklých obcí*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. 103s. ISBN 978-80-7414-981-8.

8. CLARK, Andrew J. a Jesse CASANA. A new use for old photos: Archaeological landscape reconstruction in the Big Bend. *Plains Anthropologist*. 2017, 61(240), 469-489. ISSN 0032-0447. DOI:10.1080/00320447.2016.1245967
9. DOLEJŠ, Martin, Jan PACINA, Martin VESELÝ a Dominik BRÉTT. Aerial Bombing Crater Identification: Exploitation of Precise Digital Terrain Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020, 9(12). ISSN 2220-9964. DOI:10.3390/ijgi9120713
10. JAMES, L. Allan, Michael E. HODGSON, Subhajit GHOSHAL a Mary Megison LATIOLAIS. Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*. 2012, 137(1), 181-198 [cit. 2022-10-07]. ISSN 0169555X. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.039
11. GRYGAR M., T. Matys, O. BÁBEK, J. SEDLÁČEK, Z. LENĎÁKOVÁ, M. FAMĚRA, J. ŠTOJDL, J. PACINA a J. TOLAZSOVA. Segregation and retention of As, potentially toxic metals, and organic pollutants in a reservoir from the Ohře River (the Czech Republic). *Journal of Soils and Sediments*. 2020, 20(7), 2931-2948 [cit. 2022-10-09]. ISSN 1439-0108. DOI:10.1007/s11368-020-02636-w
12. HUGHES, Michael L., Patricia F. MCDOWELL a W. Andrew MARCUS. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*. 2006, 74(1-4), 1-16 [cit. 2022-10-07]. ISSN 0169555X. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.001
13. JAGALINGAM, P., B.J. AKSHAYA a Arkal Vittal HEGDE. Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery. *Procedia Engineering*. 2015, 116, 560-566. ISSN 18777058. DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.326
14. KRATOCHVÍLOVÁ, Darina a Jiří CAJTHAML. Using the automatic vectorisation method in generating the vector altimetry of the historical Vltava River valley. *Acta Polytechnica*.

- 2020, 60(4), 303-312. ISSN 1805-2363.
DOI:10.14311/AP.2020.60.0303
15. MAXWELL, Aaron, Michelle BESTER, Luis GUILLEN, et al. Semantic Segmentation Deep Learning for Extracting Surface Mine Extents from Historic Topographic Maps. *Remote Sensing*. 2020, 12(24). ISSN 2072-4292. DOI:10.3390/rs12244145
16. MATYS GRYGAR, T., M. HOŠEK, J. PACINA, et al. Changes in the geochemistry of fluvial sediments after dam construction (the Chrudimka River, the Czech Republic). *Applied Geochemistry*. 2018, 98, 94-108. ISSN 08832927. DOI:10.1016/j.apgeochem.2018.09.012
17. MILAN, David J., George L. HERITAGE, Andrew R.G. LARGE a Ian C. FULLER. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. *Geomorphology*. 2011, 125(1), 160-171. ISSN 0169555X. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.012
18. Old Maps Online [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://www.oldmapsonline.org/>
19. Oldmaps - staré mapy [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <http://oldmaps.geolab.cz/>
20. PACINA, Jan, Kamil NOVÁK a Jan POPELKA. Georelief Transfiguration in Areas Affected by Open-cast Mining. *Transactions in GIS*. 2012, 16(5), 663-679. ISSN 13611682. DOI:10.1111/j.1467-9671.2012.01339.x
21. PACINA, Jan, POPELKA, Jan a Sandra KLIMEŠOVÁ. Advanced accuracy tests of datasets gathered by UAVs. In *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017, Conference Proceedings*. 2017, Vol. 17, Issue 23, s. 13-10. ISBN 978-619-7408-03-4
22. PACINA, Jan, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Jiří ŠTOJDL, Tomáš MATYS GRYGAR a Martin DOLEJŠ. Dynamics of Sediments in Reservoir Inflows: A Case Study of the Skalka and Nechranice Reservoirs, Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-*

- Information. 2020, 9(4). ISSN 2220-9964. DOI: doi:10.3390/ijgi904025
23. PACINA, Jan, Jiří CAJTHAML, Darina KRATOCHVÍLOVÁ, Jan POPELKA, Vojtěch DVORÁK a Tomáš JANATA. Pre-dam valley reconstruction based on archival spatial data sources: Methods, accuracy, and 3D printing possibilities. *Transactions in GIS*. 2022, 26(1), 385-420. ISSN 1361-1682. DOI:10.1111/tgis.12854
24. PULIGHE, Giuseppe a Francesco FAVA. DEM extraction from archive aerial photos: accuracy assessment in areas of complex topography. *European Journal of Remote Sensing*. 2017, 46(1), 363-378. ISSN 2279-7254. DOI: doi:10.5721/EuJRS20134621
25. SEDLÁČEK, Jan, Ondřej BÁBEK, Tomáš Matys GRYGAR, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Jan PACINA, Jiří ŠTOJDL, Michal HOŠEK a Jitka ELZNICOVÁ. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs. *Journal of Hydrology*. 2022, 605. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127397
26. SEVARA, Christopher, Geert VERHOEVEN, Michael DONEUS a Erich DRAGANITS. Surfaces from the Visual Past: Recovering High-Resolution Terrain Data from Historic Aerial Imagery for Multitemporal Landscape Analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 2018, 25(2), 611-642. ISSN 1072-5369. DOI:10.1007/s10816-017-9348-9
27. SCHLEISS, Anton J., Mário J. FRANCA, Carmelo JUEZ a Giovanni DE CESARE. Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*. 2016, 54(6), 595-614. ISSN 0022-1686. DOI: 10.1080/00221686.2016.1225320
28. SKALOŠ, Jan, Martin WEBER, Zdeněk LIPSKÝ, Ivana TRPÁKOVÁ, Markéta ŠANTRŮČKOVÁ, Lenka UHLÍŘOVÁ a Pavel KUKLA. Using old military survey maps and orthophotograph maps to analyse long-term land cover changes – Case study (Czech Republic). *Applied Geography*. 2011, 31(2), 426-438. ISSN 01436228. DOI: doi:10.1016/j.apgeog.2010.10.004

29. SKALOŠ, Jan a Ivana KAŠPAROVÁ. Landscape memory and landscape change in relation to mining. *Ecological Engineering*. 2012, 43, 60-69. ISSN 09258574.
30. ŠOBR, Miroslav. Nová bathymetrická měření šumavských jezer. Plzeň: Přírodovědecká fakulta, 2003.
31. TOBIÁŠ, Pavel a Jirí CAJTHAML. Models of cultural heritage buildings in a procedurally generated geospatial environment. *Transactions in GIS*. 2021, 25(2), 1104-1122 [cit. 2022-10-10]. ISSN 1361-1682. DOI:10.1111/tgis.12727
32. ZBOŘIL, Aleš. Prášílské jezero. Praha: Geografie – Sborník České geografické společnosti, 1996.
33. ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. 1979, 203(1153), 405-426. ISSN 0080-4649. DOI:10.1098/rspb.1979.0006
34. VICHROVÁ M. Digital terrain model of the Second Military Survey –Two model territories: the surroundings of the town Rokycany and part of the military training area Brdy. *E-Perimetron*, 7(3), 124-135. 2012.
35. YEU, Yeon, Jurng-Jae YEE, Hong YUN a Kwang KIM. Evaluation of the Accuracy of Bathymetry on the Nearshore Coastlines of Western Korea from Satellite Altimetry, Multi-Beam, and Airborne Bathymetric LiDAR. *Sensors* . 2018, 18(9). ISSN 1424-8220. DOI:10.3390/s18092926

V rámci rozšířeného abstraktu bylo převzato několik obrázků a částí textu z publikace [22], [23] a dosud nepublikované knihy „Vltava – proměny historické krajiny“.

doc. Ing. Jan Pacina, Ph.D.

Osobní data

datum narození: 18. října 1980
stav: ženatý, 3 děti
bydliště: Mjr. Šulce 1, 430 01 Chomutov
email: jan.pacina@fsv.cvut.cz

Vzdělání

doc. 2018, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie, habilitační práce: *Landscape change detection using spatial data and methods of geoinformatics*.
Ph.D. 2005-2008, (2005–2006 Ph.D. program Aplikovaná matematika, 2006 – 2008 Ph.D. program Geomatika – FAV ZČU v Plzni). Disertační práce: *Automatické vymezování elementárních forem georeliéfu jako součást Geomorfologického informačního systému*.
Ing. Magisterský studijní program Geomatika – Fakulta aplikovaných věd, ZČU v Plzni.

Pedagogická a profesní praxe

2003 Fotogrammetrie s.r.o., Most, zpracování snímků
2005 - 2008 FAV ZČU v Plzni, katedra matematiky – vedení cvičení v rámci Ph.D. studia (GIS, geometrie)
2008 - 2017 UJEP v Ústí nad Labem, odborný asistent, vedení přednášek, cvičení a projektů
od 2011 člen interdisciplinárního týmu pod Českým egyptologickým ústavem FF UK v Praze – výzkum na 6. nilském kataraktu, Súdán
od 2013 spolupráce s Historickým ústavem AV ČR na tvorbě „Historických atlasů měst“
2015 MŠMT – hodnotitel OP VVV, člen hodnotící komise OP VVV
2016 - 2017 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, odborný asistent, vedení přednášek, cvičení, školitel specialista

- od 2018 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, docent, vedení přednášek, školitel doktorandů, zapojení do projektové činnosti
- od 2018 UJEP v Ústí nad Labem, docent, vedení přednášek a cvičení, vedení projektů, garant předmětu doktorského studia
- 2019 European Commission – Člen hodnotící komise (remote expert, consensus evaluation) programu Horizon 2020
- od 2020 FŽP UJEP - garant studijního programu Aplikovaná geoinformatika
- od 2020 člen akademického senátu FŽP UJEP
- 2021 European Commission – Člen hodnotící komise (remote expert, consensus evaluation) programu Horizon Europe

Vědecká a výzkumná činnost

- 2004 člen týmu grantu „*ESRI FIG grant*“
- 2006 - 2007 spoluřešitel grantu „*Rozvojový projekt 682 - (projekt EFEKT – 06)*.“
- 2008 - 2009 člen týmu grantu *GA ČR 205/07/0385*
- 2009 - 2010 člen týmu grantu *VaV MŠMR č. 1M0554*
- 2009 - 2012 spoluřešitel grantu *TransEcoNet, program OP NSSE 1CE061P3*
- 2011 - 2012 hlavní řešitel grantu *IGA UJEP „Informační systém Severozápadních Čech pro správu historických mapových podkladů“*
- 2011 - 2015 spoluřešitel grantu *NAKI Ministerstva kultury ČR DF11P01OVV005*
- 2011 - 2015 spoluřešitel grantu *Cíl 3, ArchaeoMontan*
- 2012 - 2015 řešitel grantu *NAKI Ministerstva kultury ČR DF12P01OVV043*
- 2012 - 2015 člen řešitelského týmu grantu *NAKI Ministerstva kultury ČR DF12P01OVV047*
- 2013 - 2014 hlavní řešitel grantu *IGA UJEP „Rekonstrukce krajiny Mostecké pánve na základě historických datových podkladů“*
- 2015 - 2018 odpovědný řešitel grantu *SN-CZ 2020, ArchaeoMontan 2018*

- 2015 - 2018 hlavní řešitel grantu IGA UJEP „*Využití metod geoinformatiky pro sledování změn krajiny*“
- 2015 - 2020 člen řešitelského týmu grantu NAKI Ministerstva kultury ČR DG16P02M028
- 2017 - 2019 člen řešitelského týmu grantu GA ČR, reg. č. 17-06229S
- 2017 - 2019 člen řešitelského týmu grantu SN-CZ 2020 „*Naše světové dědictví - Hornická kulturní krajina Krušnohoří/Erzgebirge*“
- 2018 - 2022 člen řešitelského týmu grantu Smart City – Smart Region – Smart Community.
- 2018 - 2022 člen řešitelského týmu grantu NAKI Ministerstva kultury DG12P02OVV066
- 2018 - 2022 člen řešitelského týmu grantu NAKI Ministerstva kultury DG18P02OVV037
- 2022 - 2024 hlavní řešitel grantu TA ČR za UJEP, Prostředí pro život, reg. č. SS05010157
- 2022 - 2024 člen řešitelského týmu grantu TA ČR, Prostředí pro život, reg. č. SS050010090

Nejvýznamnější publikace

MINÁR, J., JENČO M., EVANS I. S., MINÁR J., KADLEC M., KRCHO J., PACINA J., BURIAN L. a A. BENOVÁ. *Third-order geomorphometric variables (derivatives): definition, computation and utilization of changes of curvatures*. International Journal of Geographical Information Science. 2013. Vol. 27, issue 7, s. 1381-1402. DOI: 10.1080/13658816.2013.792113.

VARADZIN L., VARADZINOVÁ L., PACINA J. From holes to huts: reconstructing an extinct type of architecture at the Sixth Nile Cataract (Sudan). *Antiquity*. 2017. Vol. 9, Issue 357, pp 589-604. DOI: 10.15184/aqy.2017.68

PACINA, Jan, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Jiří ŠTOJDL, Tomáš MATYS GRYGAR a Martin DOLEJŠ. Dynamics of Sediments in Reservoir Inflows: A Case Study of the Skalka and Nechranice Reservoirs, Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020, 9(4). ISSN 2220-9964. DOI:10.3390/ijgi9040258

DOLEJŠ, Martin, Jan PACINA, Martin VESELÝ a Dominik BRÉTT. Aerial Bombing Crater Identification: Exploitation of Precise Digital Terrain Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020, 9(12). ISSN 2220-9964. DOI:10.3390/ijgi9120713

SEDLÁČEK, Jan, Ondřej BÁBEK, Tomáš Matys GRYGAR, Zuzana LENĎÁKOVÁ, Jan PACINA, Jiří ŠTOJDL, Michal HOŠEK a Jitka ELZNICOVÁ. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs. *Journal of Hydrology*. 2022, 605. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127397. Decile D1.

PACINA, Jan, Jiří CAJTHAML, Darina KRATOCHVÍLOVÁ, Jan POPELKA, Vojtěch DVOŘÁK a Tomáš JANATA. Pre-dam valley reconstruction based on archival spatial data sources: Methods, accuracy, and 3D printing possibilities. *Transactions in GIS*. 2022, 26(1), 385-420. ISSN 1361-1682. DOI:10.1111/tgis.12854

Spoluautor knihy „Afrika zevnitř“, nominované na cenu Magnesia Litera 2017 v sekci „Litera za naučnou literaturu“.

POKORNÝ, P. a kol.: *Afrika zevnitř*. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-2628-9. 2017.